

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**Análisis de una red de monitoreo de calidad de agua en la cuenca del río
Jequetepeque mediante análisis multivariado**

Tesis para optar el grado de **Magister en Gestión de los Recursos Hídricos**, que
presenta el alumno:

José Satoshi Flores Takahashi

ASESORA:

Dra. Nadia Rosa Gamboa Fuentes

JURADO

Dr. (a): Carlos Nilberto Veliz Capuñay

Dr. (a): Carlos Enrique Tavares Corrêa

Lima, julio del 2017

RESUMEN

Los programas de monitoreo de calidad del agua superficial son muy importantes para la gestión integrada de los recursos hídricos. Estos programas comprenden la definición de los objetivos de monitoreo, el diseño de las redes, las actividades de muestreo propiamente, el análisis de las muestras en el laboratorio, la recopilación y el procesamiento de datos para obtener información sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua monitoreado. Resulta, pues, necesaria la evaluación periódica de estas redes de monitoreo con el fin de garantizar una gestión sostenible del recurso.

En el Perú, los conflictos socioambientales registrados entre los años 2011 y 2014 muestran que 67% están vinculados a la calidad de los recursos hídricos y 62% a las disputas entre el uso minero y el uso agrario. Como medida de gestión, la Autoridad Nacional del Agua ha establecido redes de monitoreo en un total de 100 cuencas hidrográficas y ha ejecutado 434 monitoreos de calidad del agua superficial. Una de las cuencas más representativas, en la que se desarrollan ambas actividades socioeconómicas y que presenta conflictos socioambientales latentes, es la cuenca del río Jequetepeque. En esta cuenca, el monitoreo ha sido desarrollado por varias instituciones, tanto públicas como privadas, desde los años 80s. Cada estudio ha establecido una red propia de monitoreo de calidad de aguas de acuerdo a sus objetivos, sin embargo, hasta el momento, la evaluación de las redes de monitoreo de calidad de aguas superficiales no se encuentra en la agenda nacional.

El objetivo de esta tesis es analizar una red de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque por análisis estadístico de la relevancia de las estaciones de monitoreo y de los parámetros de calidad del agua monitoreados en la cuenca. Para ello, se aplicaron las técnicas de análisis multivariado - análisis factorial y análisis de conglomerados - a la base de datos de parámetros de los monitoreos realizados por la ANA durante los años 2015 y 2016.

Los resultados revelaron que 5.88% de las estaciones de monitoreo y 5% de los parámetros de calidad del agua no se correlacionan con las demás estaciones y parámetros analizados. El descarte de la estación y del parámetro que resultaron estar menos correlacionados resulta inadecuado, debido a la importancia de ambos para la red de monitoreo. El conjunto de parámetros de calidad de agua se reduce a cuatro grupos que definen la calidad del recurso hídrico superficial en la cuenca: un grupo distribuido en la parte baja de la cuenca y relacionado a la conductividad eléctrica, otro grupo relacionado a los sólidos suspendidos distribuidos en toda la cuenca, y dos grupos conformados por los elementos trazas y los coliformes distribuidos principalmente en la parte alta de la cuenca. Finalmente, con esta tesis se evidenció que las técnicas de análisis multivariado resultan adecuadas para el análisis de las redes de monitoreo de calidad del agua y que pueden ser empleadas para asegurar la gestión sostenible del recurso hídrico.

ABSTRACT

The establishment of surface water quality monitoring programs plays a key role in the Integrated Water Resources Management. These programs include the definition of the monitoring objectives, the network desing, the sampling protocol, laboratory samples analysis, collection and processing of data through which the desired information will be obtained about the physical, chemical and biological properties of the monitored water body. Therefore, to ensure a sustainable water resources management, a periodically assessment of the monitoring network is mandatory.

In Perú, 67% of the socio-environmental conflicts registered between 2011 and 2014 were related to water quality and 62% to disputes between mining and agriculture. As a management measure, the National Water Authority has established surface water quality monitoring networks in one hundred basins, and has monitored the surface water quality 434 times. A representative basin in the country, one which has agriculture and mining as principal socio-economic activities and also presents latent socio-environmental conflicts related to water, is the Jequetepeque river basin. Since the 80's, surface water quality monitoring programs in the Jequetepeque river basin has been executed by different institutions and each one has established monitoring networks according to their objectives. Nevertheless, the surface water quality monitoring networks assessment has not been taken into account in any water national plan.

The main objective of this thesis is to analyze the surface water quality monitoring network in the Jequetepeque river basin using statistical significance analysis of the water quality monitoring stations and water quality parameters established to evaluate the water quality in the basin. Multivariate statistical techniques like factor analysis (FA) and hierarchical cluster analysis (HCA) has been applied to the water quality monitoring database collected in the basin between 2015 and 2016 by the National Water Authority.

Results identified that only 5,88% of the monitoring stations and 5% of the water quality parameters were statistical uncorrelated with the other stations and analyzed parameters in the monitoring network. The discarding of the station and parameter that were less correlated may be inadequate, due to the importance of both for the monitoring network. Four main groups define the surface water quality in the basin: the first group is highly related to the electric conductivity and is mainly distributed in the lower part of the basin, a second group is related to suspended solids and is distributed in all the basin, and two groups constituted by trace elements and fecal coliform are principal distributed in the higher part of the basin. Finally, this thesis showed that multivariate statistical techniques can be effectively applied in the analysis of water quality monitoring networks and can be employed in the sustainable management of water resources.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia, a mi madre y hermano, por su constante apoyo y motivación en cada aspecto de mi vida, en el transcurso de mi desarrollo profesional y en la realización de esta tesis.

Agradezco a la Dra. Nadia Gamboa por su entera dedicación, disposición y asesoría durante todo el proceso que ha tomado el desarrollo de esta tesis y, en especial, por haber confiado en mí y haberme brindado la oportunidad de ser su tesista, su alumno.

También quiero agradecer al Dr. Carlos Tavares por la asesoría brindada durante la maestría, en el desarrollo de la tesis y, en especial, por las últimas sugerencias que me ayudaron a retomar el camino adecuado y así poder culminar esta etapa.

Agradezco al Dr. Carlos Veliz por la asesoría brindada durante la última etapa en el desarrollo de esta tesis, por los aportes y sugerencias que permitieron mejorar sustancialmente esta tesis.

Asimismo, agradezco a la Escuela de Posgrado por haberme otorgado el Fondo Marco Polo que me permitió realizar una pasantía en la Universidad del Valle en Colombia, y así profundizar mis conocimientos en las técnicas de análisis multivariado aplicadas en esta tesis.

Agradezco a la Dra. Marisol Gordillo por su disposición y enseñanzas brindadas durante mi estadía en la Universidad del Valle, que me permitieron comprender los principios básicos del análisis multivariado y su ejecución en el programa SPSS.

Al Dr. Mario Rincón por haber realizado las gestiones necesarias para realizar mi pasantía, por brindarme las mejores condiciones para mantenerme concentrado y así poder alcanzar mis objetivos durante mi estancia en la Universidad del Valle.

Debo agradecer al proyecto Alfa-Paraguas Red Andina de Posgrado en Gestión Integral de Recursos Hídricos, que me permitió realizar el reconocimiento de la zona de estudio en la cual se desarrolló esta tesis.

Agradezco a todos los profesores de la Maestría en Gestión de los Recursos Hídricos quienes me presentaron y permitieron conocer sobre el mundo del agua desde otra perspectiva a la que tiene un Químico. Muchas gracias.

Finalmente, agradezco a todos amigos y en especial a mi amigo York Villar por la confianza depositada en mí y por su ayuda durante el proceso de inscripción en la maestría.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2. Hipótesis	8
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivos generales	8
1.3.2. Objetivos específicos	9
2. LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	10
2.1 La calidad del agua	10
2.2 Parámetros de la calidad del agua	12
2.2.1 Propiedades físicas	12
2.2.2 Parámetros químicos	13
2.3 El derecho humano al agua	17
2.4 Mecanismo de comando y control	23
2.5 Diseño de una red de monitoreo y su importancia en la GIRH	27
2.6 Aspectos legales e instrumentos de gestión de calidad de los recursos hídricos	32
2.6.1 Política Nacional del Ambiente (PNA)	33
2.6.2 Política y estrategia nacional de los recursos hídricos	34
2.6.3 Plan Nacional de Recursos Hídricos	38
2.6.4 Ley de Recursos Hídricos	38
2.6.5 Estándares nacionales de calidad ambiental para aguas	39
2.6.6 Límites máximos permisibles	40
2.6.7 Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales	40
2.6.7.1 Monitoreo de la calidad del cuerpo receptor de vertimientos autorizados	41
2.6.7.2 Monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales	42
3. EL ANÁLISIS MULTIVARIADO	47
3.1 Definición	47
3.2 Análisis y pretratamiento de datos	47

3.3	El análisis de conglomerados	48
3.4	Análisis factorial.....	53
4.	CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE	61
4.1	Aspectos meteorológicos y vegetación.....	62
4.2	Aspecto demográfico	63
4.3	Aspectos geológico y geomorfológico	64
4.4	Aspectos socioeconómicos.	70
4.5	Usos del territorio	72
4.6	Recurso hídrico	73
4.6.1	Balance hídrico superficial.....	73
4.6.2	Usos del agua.....	74
4.6.3	Erosión hídrica y salinización.....	74
4.6.4	Calidad del agua.....	75
5	METODOLOGÍA	77
5.1	Datos iniciales	77
5.2	Datos finales.....	80
5.3	Método estadístico	85
5.3.1	Análisis y pretratamiento de datos.....	85
5.3.2	Análisis multivariado	85
5.4	Diagrama de procedimiento.....	86
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	88
6.1	Análisis multivariado.....	88
6.1.1	Análisis de agrupamiento jerárquico.....	88
6.1.2	Análisis factorial.....	91
6.2	Validación del análisis multivariado	100
6.2.1	Análisis de agrupamiento Jerárquico.....	100
6.2.2	Análisis factorial.....	104
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
7.1.	Conclusiones.....	119

7.2. Recomendaciones.....	120
8 BIBLIOGRAFÍA.....	121
9 ANEXOS	131



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de intercambio natural	10
Figura 2. Procesos de intercambio antropogénicos	11
Figura 3. Implementación de los instrumentos de comando y control en un proceso productivo.....	25
Figura 4. Programa de monitoreo de calidad del agua.....	27
Figura 5. Ciclo para desarrollar un plan de GIRH.....	31
Figura 6. Instrumentos de planificación de los recursos hídricos	33
Figura 7. Proceso del análisis de conglomerados	49
Figura 8. Distancia euclidiana entre dos objetos	49
Figura 9. Representación de un dendrograma	52
Figura 10. Variables superficiales medidas en los sujetos	54
Figura 11. Tipos de factores y su influencia en las variables superficiales	54
Figura 12. Influencia de los factores en el valor medido de una variable superficial	55
Figura 13. Pasos para el análisis factorial	55
Figura 14. Rotación ortogonal	57
Figura 15. Rotación oblicua.....	58
Figura 16. Cuenca del río Jequetepeque.....	62
Figura 17. Mapa geomorfológico de la cuenca Jequetepeque.....	65
Figura 18. Características estratigráficas para la cuenca del Jequetepeque	66
Figura 19. Mapa geológico de la cuenca del Jequetepeque	68
Figura 20. Franja de oro y cobre del norte del Perú.....	70
Figura 21. Estaciones monitoreadas por la ANA durante el periodo 2015-2016.....	79
Figura 22. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo del estudio de la ANA considerados en esta tesis.....	81
Figura 23. Distribución de las estaciones de monitoreo en el mapa geológico de la cuenca.....	84
Figura 24. Proceso del análisis multivariado aplicado.....	87
Figura 25. Dendrograma de las estaciones de monitoreo para el periodo anual	89
Figura 26. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2.....	95
Figura 27. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4.....	96
Figura 28. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1 y 2 de los parámetros.....	98
Figura 29. Dendrogramas de las estaciones en temporada de avenida (O) y en temporada de estiaje (P)	102
Figura 30. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 sin rotar para la temporada de avenida.....	107
Figura 31. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4 sin rotar para la temporada de avenida.....	108

Figura 32. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1 y 2 de los parámetros para la temporada de avenida	110
Figura 33. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 sin rotar para la temporada de estiaje	113
Figura 34. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1y 2 de los parámetros para la temporada de estiaje.....	115
Figura 35. Estaciones significativas estadísticamente en la red de monitoreo de la cuenca del río Jequetepeque	118



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentos de comando y control	24
Tabla 2. Estrategias de intervención con sus respectivos lineamientos en torno a la gestión de calidad de los recursos hídricos	36
Tabla 3. Estándares nacionales de calidad ambiental para agua, de acuerdo a categorías	39
Tabla 4. Cantidad de parámetros a evaluar de LMP por sector	40
Tabla 5. Criterios para el monitoreo de calidad de un cuerpo receptor de vertimientos autorizados	41
Tabla 6. Criterios para el monitoreo de calidad de los recursos hídricos superficiales	43
Tabla 7. Puntuaciones de dos variables sobre los sujetos A-G	50
Tabla 8. Distancias euclidianas entre los sujetos	50
Tabla 9. Agrupamiento de clúster jerárquico	51
Tabla 10. Comparación entre las cargas de los factores rotados y no rotados	58
Tabla 11. Unidades bioclimáticas de la cuenca del Jequetepeque	63
Tabla 12. Aspectos geomorfológicos	64
Tabla 13. Aspectos geológicos en la cuenca del Jequetepeque	67
Tabla 14. Usos del territorio en la cuenca del Jequetepeque	72
Tabla 15. Límites de detección utilizados en esta tesis	78
Tabla 16. Distribución de las estaciones de monitoreo en las formaciones geológicas	83
Tabla 17. Grupos formados del ACJ de las estaciones para el período anual	88
Tabla 18. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ	90
Tabla 19. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para el periodo anual	91
Tabla 20. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para el periodo anual	92
Tabla 21. Definición de los factores obtenidos del AF	97
Tabla 22. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para el periodo anual	99
Tabla 23. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ para la temporada de avenida (O)	103
Tabla 24. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ para la temporada de estiaje (P)	104
Tabla 25. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para la temporada de avenida	105
Tabla 26. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para la temporada de avenida	106
Tabla 27. Definición de los factores obtenidos del AF	108
Tabla 28. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para la temporada de avenida	110
Tabla 29. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para la temporada de estiaje	111

Tabla 30. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para la temporada de estiaje.....	112
Tabla 31. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para la temporada de estiaje	115



ÍNDICE DE ANEXOS

Lista de tablas

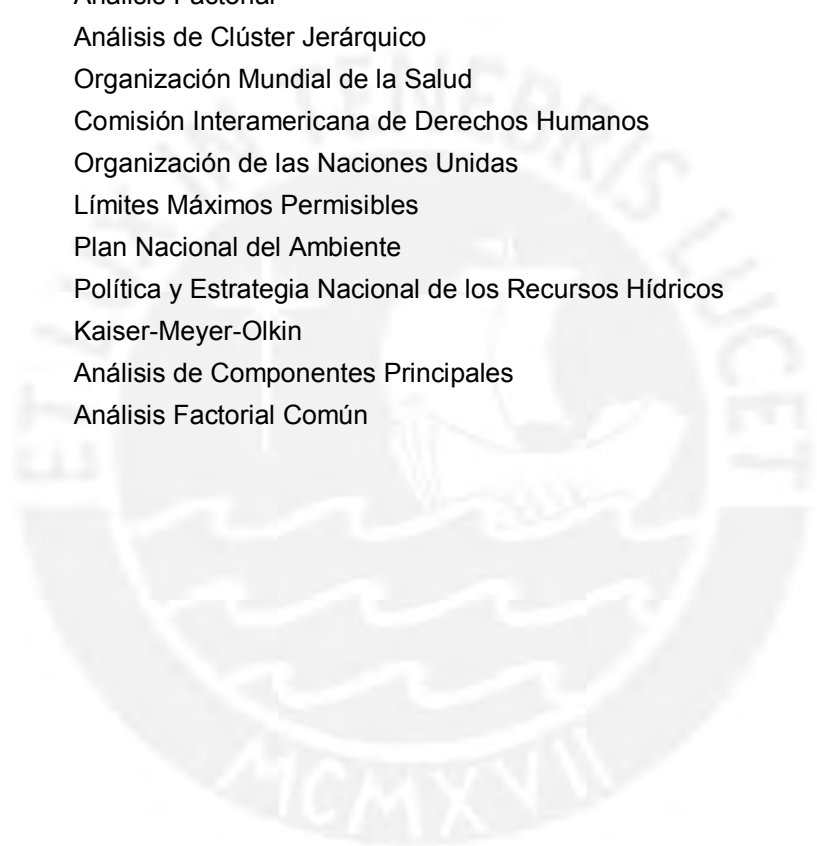
Tabla A. Estaciones monitoreadas en el estudio de la ANA	131
Tabla B. Parámetros analizados en el estudio realizado por la ANA	132
Tabla C. Estaciones de monitoreo analizadas en esta tesis	133
Tabla D. Parámetros fisicoquímicos a utilizar en el análisis multivariado en esta tesis.....	133
Tabla E. Base de datos finales luego del tratamiento de datos.....	134
Tabla F. Base de datos para la temporada de avenida.....	137
Tabla G. Base de datos para la temporada de estiaje	139

Lista de figuras

Figura A. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2	141
Figura B. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4	141
Figura C. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores rotados 1 y 2 de los parámetros	142
Figura D. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 rotados para la temporada de avenida.....	142
Figura E. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4 rotados para la temporada de avenida.....	143
Figura F. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores rotados 1 y 2 de los parámetros para la temporada de avenida	143
Figura G. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 rotados para la temporada de estiaje	144
Figura H. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4 rotados para la temporada estiaje.....	144
Figura I. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores rotados 1 y 2 de los parámetros para la temporada de estiaje.....	145

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
GCRH	Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos
SNRGH	Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
PNRH	Plan Nacional de los Recursos Hídricos
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
LRH	Ley de los Recursos Hídricos
AF	Análisis Factorial
ACJ	Análisis de Clúster Jerárquico
OMS	Organización Mundial de la Salud
CIDH	Comisión Interamericana de Derechos Humanos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
LMP	Límites Máximos Permisibles
PNA	Plan Nacional del Ambiente
PENRH	Política y Estrategia Nacional de los Recursos Hídricos
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
ACP	Análisis de Componentes Principales
AFC	Análisis Factorial Común



1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al último informe global de riesgos del Foro Económico Mundial, la constante presión ejercida sobre los recursos hídricos ha conducido a que la crisis del agua sea considerada como el tercer riesgo con mayor impacto social, económico, tecnológico, geopolítico y ambiental a nivel mundial (World Economic Forum, 2017). La población crece a un ritmo de 78 millones de personas al año y se estima que la población se incremente en mil millones para el año 2030 (US Census Bureau, 2016). La economía mundial ha crecido sustancialmente entre los años 1961 y 2015 con un aumento del producto interno de 3,8% (Banco Mundial, 2015). A pesar de dicho crecimiento económico, las malas prácticas de gestión y conservación han ocasionado, por ejemplo, que cerca de mil millones de personas carezcan de acceso al agua (OMS, 2016). Estas tendencias indican que el crecimiento demográfico y actividades como la urbanización, industrialización y producción de alimentos son factores de presión sobre los recursos naturales y, en especial, sobre los recursos hídricos (UN-Water, 2015).

Dicha presión es tanto por cantidad como por calidad del recurso. Cada vez se demanda mayor cantidad de agua limpia para satisfacer las necesidades de la población que crece continuamente. Durante las dos últimas décadas, el crecimiento urbano, principalmente en zonas áridas, viene incrementando la presión sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, y el uso de grandes cantidades de agua por la agricultura y la producción de energía incrementan la escasez del recurso (UN-Water, 2015). A nivel mundial, 70% de los recursos hídricos en la actualidad son utilizados por la agricultura, 15% en la producción de energía y 10% en usos domésticos. Se estima que, para el año 2030, habrá déficit de 40% de los recursos hídricos requeridos para los procesos de producción y, para el año 2050, la demanda global se incrementará en 55% (The Water Project, 2016; UN-Water, 2015).

La calidad de los recursos hídricos se afecta por el vertimiento de residuos de todo tipo sin el tratamiento adecuado y las malas prácticas agrícolas. Entre los principales contaminantes asociados a efluentes industriales están los elementos tóxicos (metales pesados y no metales), solventes orgánicos (benceno, acetona, hexano, etc.) y otros residuos tóxicos (compuestos organoclorados y organoestánicos utilizados principalmente en desinfectantes y plaguicidas). Los principales contaminantes asociados a las actividades agrícolas provienen de los fertilizantes y los pesticidas que incrementan la concentración de nitrógeno y fósforo (responsables de la eutrofización de las aguas) y de otros compuestos químicos tóxicos (pesticidas organoclorados). Adicionalmente, se han detectado productos farmacéuticos y aditivos químicos de uso industrial en aguas (UN-Water, 2011). Estos contaminantes afectan a los seres humanos a través del consumo directo de aguas contaminadas o por consumo de peces o alimentos que han bioacumulado las

sustancias tóxicas. Actualmente, al menos 1,8 millones de personas utilizan aguas contaminadas con materia fecal como su única fuente de agua potable. Se cuentan dos millones de muertes anuales directamente causadas por el consumo de agua de mala calidad y más de cincuenta países aún reportan casos de cólera (OMS, 2016).

Varios países han adoptado la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en sus políticas de gestión del agua (Hassing *et al.*, 2009; UNEP, 2012). El fin principal de la GIRH es maximizar el bienestar social de las personas sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Pochat, 2008). Su implementación considera tres principios claves: equidad, integridad ecológica y eficiencia (Van der Zaag, 2008). Un aspecto relevante es que el recurso hídrico debe estar en cantidad suficiente y ser de calidad idónea para la supervivencia de la sociedad. Por lo tanto, la Gestión de Calidad del Recurso Hídrico (GCRH) es un eje clave para el cumplimiento de la GIRH. La GCRH se centra en determinar las características físicas, químicas y biológicas del agua e incluye aspectos tales como el impacto económico en las actividades humanas, las negociaciones políticas y el análisis social de los peligros potenciales que pueden resultar de la degradación ambiental o de las limitaciones económicas (Biswas *et al.*, 2006). Para ello, la GCRH cuenta con una serie de instrumentos o mecanismos: mecanismos de comando-control, instrumentos económicos, construcción de consensos sociales, y mecanismos de adhesión voluntaria. El mecanismo de comando-control enfatiza el establecimiento de los objetivos de calidad, los estándares de calidad, y los programas de monitoreo, seguimiento y fiscalización de los recursos hídricos (Porto y Lobato, 2004a, 2004b).

El establecimiento de programas de monitoreo de calidad del agua a nivel de cuenca es de suma importancia para la realización e implementación tanto de la GCRH como de la GIRH. Estos programas abarcan todas las actividades de muestreo y el diseño de las redes de monitoreo para luego recopilar y procesar datos de las propiedades físicas, químicas y biológicas de un cuerpo de agua con el fin de obtener información acerca de su calidad y, de esa manera, conocer las contribuciones natural y humana que modifican la calidad del recurso (Asadollahfardi, 2015). La información obtenida de los programas de monitoreo debe ser procesada adecuadamente y plasmarse de manera comprensible para los gestores y el público en general, con el fin de que ayuden a los procesos de toma de decisión en torno a la GCRH (Harmancioglu *et al.*, 1999). El procesamiento y tratamiento de datos de calidad de agua se realizan mediante herramientas estadísticas. De todas ellas, el análisis multivariado se ha utilizado últimamente con diversos fines y, en algunos casos, se ha centrado en la evaluación de la distribución espacial y temporal de metales en una cuenca, el análisis de los índices de calidad de agua superficial en una red de monitoreo, entre otros (Espejo *et al.*, 2012; Odayooth *et al.*, 2014 ;Ouyang, 2005; Yacoub *et al.*, 2013).

Para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el país, la Ley de los Recursos Hídricos N° 29338, establece que el ente rector es la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos (SNGRH). Según el artículo 76, la ANA fiscaliza, supervisa y controla el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del Agua. Además, establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua, implementa actividades de vigilancia y monitoreo en cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o la cantidad del recurso y desarrolla el Plan Nacional de los Recursos Hídricos (PNRH) (Ley de Recursos Hídricos, 2009).

Una política fundamental, según el PNRH, es el establecimiento de redes de monitoreo, protocolos de muestreo y trabajar con laboratorios acreditados para la GCRH en cada cuenca del país (ANA, 2013). A través de la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos y mediante el Plan Nacional de Vigilancia y Monitoreo de la Calidad de Agua en el Perú, se debe implementar el plan de gestión de calidad del agua, redes de monitoreo de calidad de agua, y generar información para la toma de decisiones. Entre los años 2011 y 2015 se han establecido redes de monitoreo y se han ejecutado 434 monitoreos en un total de 100 cuencas hidrográficas de las 159 que existen en el país: 40% en la macrorregión sur, 28% en la macro región norte, 13 % en la macrorregión oriente, 11 % en la macrorregión centro y 8% en la macrorregión Lima (ANA, 2016d).

Los conflictos socioambientales por el agua en el Perú se deben principalmente a tres causas: la cantidad, la calidad y la oportunidad de uso en el tiempo y espacio adecuado (Pereyra, 2009). Entre enero de 2011 y diciembre de 2014, la Defensoría del Pueblo ha registrado 153 casos de conflictos socioambientales vinculados a los recursos hídricos, 67% de los cuales están relacionados a la actividad minera y, en referencia a la calidad del agua, estos conflictos representan 67% del total de los conflictos registrados (Defensoría del Pueblo, 2015).

Una de las cuencas del país que presentan conflictos vinculados a la calidad de los recursos hídricos por el desarrollo de actividades extractivas mineras es la cuenca del río Jequetepeque (GRUFIDES, 2015). En la parte alta se ubican las mineras Yanacocha y Sipán, esta última en etapa de cierre, y en la parte baja se desarrolla principalmente la agricultura (Chunga, 2006). Por tal motivo, el monitoreo de la calidad del agua del río resulta indispensable para el desarrollo de la GIRH en la cuenca. El monitoreo en esta cuenca ha sido desarrollado por diversas instituciones, tanto públicas como privadas, a distintos niveles desde el año 1980. Los objetivos de algunos estudios se centran en identificar los problemas de calidad de agua, describir las distribuciones espacial y temporal de diversos contaminantes y el efecto de la represa Gallito Ciego en la parte baja de la cuenca (Girón, 2003; MINAGRI, 2013; ONERN, 1986; Ríos, 2013; Yacoub *et al.*, 2013). Cada estudio estableció una red propia de estaciones de monitoreo de calidad de agua de acuerdo a sus objetivos.

Es claro, por tanto, que el establecimiento y correcto funcionamiento de una red de monitoreo en una cuenca es esencial para la evaluación de la calidad del agua, planificar una posible restauración en caso de ocurrir una contaminación, y garantizar la protección del recurso. Sin embargo, en los monitoreos realizados por la ANA y otros autores en diversas cuencas, que implican el desarrollo de redes monitoreo de calidad de agua para sus fines, aún no se ha realizado el análisis de la eficacia de las redes de monitoreo en base a la relevancia tanto de las estaciones como de los parámetros de calidad de agua medidos en dichas estaciones establecidas en la red que permiten caracterizar la calidad del recurso hídrico en la cuenca. Este tipo de análisis no se encuentra en la agenda del Plan Nacional del Recurso Hídrico ni en el Plan Nacional de Vigilancia y Monitoreo de la Calidad de agua. En cambio, las políticas de GCRH en Estados Unidos, Canadá, Australia y Alemania establecen el análisis y la evaluación de las redes de monitoreo y de los parámetros de calidad del agua dentro del mecanismo comando-control (Asadollahfardi, 2015; DMA, 2000; EPA, 2013; GNWT, 2017; Harmancioglu *et al.*, 1999). La importancia de este tipo de evaluación surgió de la necesidad, en primer lugar, de contar con sistemas de información eficientes que permitan satisfacer los requerimientos de los planes de gestión de calidad del agua y, así, ayudar a los procesos de tomas de decisión, y posteriormente, contribuir a mejorar el manejo de los recursos financieros destinados a los monitoreos de calidad del agua, y así mejorar su rentabilidad (Harmancioglu *et al.*, 1999).

1.1 Planteamiento del problema

La GCRH requiere el conocimiento pleno de los procesos que afectan la calidad del recurso, pues las variaciones en la calidad afectan también la cantidad requerida para los diversos usos y, como consecuencia, se incrementan los costos en el tratamiento y en la obtención de nuevas fuentes de agua (Harmancioglu *et al.*, 1999). El establecimiento de programas de monitoreo de calidad del agua es la única manera para conocer los procesos que afectan su calidad (Khalil y Adamowski, 2013). Estos programas generan un conjunto de datos que permiten comprender los factores naturales y humanos que alteran la calidad del agua, establecer medidas de control de contaminación, realizar evaluaciones de impacto ambiental y modelamientos de los procesos de calidad de agua (Harmancioglu *et al.*, 1999), y generan la información que requieren los gestores para los procesos de toma de decisión (Khalil y Adamowski, 2013).

Los programas de monitoreo de calidad del agua involucran una serie de actividades: el establecimiento de los objetivos de monitoreo, el diseño de la red de monitoreo, el protocolo de muestreo, la identificación de un laboratorio para el análisis de las muestras, y el diseño del protocolo para el procesamiento y análisis de los datos a través de los cuales se va a obtener la información deseada (Harmancioglu *et al.*, 1999). El establecimiento de redes eficientes de monitoreo de calidad de agua es un componente crítico para la evaluación, protección y posible restauración de un cuerpo de agua. Sin embargo, en los 90s se detectaron problemas relacionados

a las bases de datos en redes de monitoreo en países desarrollados, como USA, Canadá, Australia, entre otros. El origen de estos problemas se debió al crecimiento poblacional, el crecimiento económico, la industrialización, el crecimiento urbano y el desarrollo de actividades agrícolas de manera intensiva. Como respuesta, estos países optaron por incrementar paulatinamente el número de estaciones de monitoreo, que en algunos casos llegaron a ser mil estaciones por cuerpo de agua, se realizaron los monitoreos por más de 20 años, mas no se ejecutó la evaluación y el rediseño. Como consecuencia, se incrementaron los costos de monitoreo, se obtuvieron grandes cantidades de datos que requerían la implementación de un mejor sistema de gestión de la información, pues el procesamiento y análisis de los datos demandaba más tiempo. La información de dichos monitoreos ocasionó que las tomas de decisiones no fueran efectivas (Harmancioglu *et al.*, 1999). De ahí que, la evaluación de las redes de monitoreo debe ser obligatoria pues, de esa manera, se asegura que la recolección de datos, el posible rediseño de la red y la toma de decisiones por parte de los gestores ocurran de manera óptima (Odayooth *et al.*, 2014). Sin embargo, la mayor dificultad en la evaluación y rediseño de redes de monitoreo es que no existe una guía universal que permitan evaluar las características de las redes de monitoreo, pues es imposible contar con una guía que se adapte a las necesidades que se requieran evaluar en cada cuerpo de agua en los diferentes países (Khalil y Adamowski, 2013). El diseño de una red de monitoreo consiste de tres aspectos: las estaciones de monitoreo, los parámetros a muestrear y la frecuencia de muestreo. La evaluación y el rediseño de las redes de monitoreo requiere el análisis de esos tres aspectos, los cuales vienen siendo ampliamente estudiados a través de métodos estadísticos (Khalil y Adamowski, 2013; Kim *et al.*, 2017; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005).

Las estaciones de monitoreo son analizadas a través del análisis de la regresión, del concepto de entropía y mediante el análisis multivariado (Harmancioglu *et al.*, 1999; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005). Para el análisis de los parámetros a muestrear se han propuesto principalmente dos técnicas estadísticas: el análisis de correlación-regresión y el análisis factorial (Khalil y Adamowski, 2013; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005). Para el análisis de las frecuencias de muestreo, se emplea el análisis de regresión lineal, de las autocorrelaciones a través de semivariogramas, de series de tiempo, y de intervalos de muestreo a través del concepto de entropía (Harmancioglu *et al.*, 1999; Khalil y Adamowski, 2013; Khalil *et al.*, 2014). Además, el análisis de frecuencias de muestreo requiere de bases de datos de monitoreos de varios años. Por ejemplo, Khalil *et al.* (2014) realizaron el análisis de las frecuencias de muestreo en Saskatchewan, Canadá, en una base de datos de dieciocho años de monitoreo.

Algunas investigaciones en torno a los dos primeros aspectos de la evaluación de las redes de monitoreo se han centrado, hasta el momento, en identificar las estaciones de monitoreo y las variables fisicoquímicas estadísticamente menos significativas para la red a través del análisis

multivariado, específicamente, análisis factorial y análisis de clúster jerárquico. En estas investigaciones se encontró que entre 10 y 20% de las estaciones de monitoreo y de los parámetros fisicoquímicos no eran estadísticamente relevantes para la red de monitoreo, pues los resultados de estos análisis indicaron que tales estaciones y parámetros se encontraban menos relacionados y explicaban la menor cantidad de varianza del conjunto de variables analizados (Kannel, Lee, Kanel *et al.* 2007; Noori *et al.*, 2010; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005).

El monitoreo de los recursos hídricos superficiales en muchos países es responsabilidad de las autoridades ambientales competentes. En el Perú, la ANA es la institución encargada de realizar el monitoreo de la calidad de agua superficial y de velar por el cumplimiento de las normas de calidad del agua en base a los ECA. En el marco político, normativo e institucional iniciada con la aprobación de la Ley de Recursos Hídricos (LRH), se fija la protección de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas bajo el enfoque de la GIRH. En adición a la LRH, la Política y Estrategia Nacional de los Recursos Hídricos (PENRH), el Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), y la Estrategia Nacional para el mejoramiento de la calidad de los recursos hídricos (2016-2025), recientemente aprobada (ANA, 2016a), establecen las políticas a seguir en cuanto a la Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos (GCRH) en el Perú. En ellas se menciona que deben implementarse redes de monitoreo en las cuencas hidrográficas del país como eje esencial para la realización de la GCRH y de la GIRH. Sin embargo, no se coloca en agenda el análisis de las redes de monitoreo en base a la relevancia tanto de las estaciones de monitoreo establecidos en una red y de los parámetros que se miden en dichas estaciones, las cuáles forman parte de la evaluación de las redes de monitoreo.

En base a las consecuencias experimentadas por los países desarrollados durante los años 80s-90s, resulta esencial la implementación de la evaluación de las redes de monitoreo de calidad de agua en las políticas públicas en torno a la GCRH en el Perú. Los beneficios que acarrea esta implementación serían diversos, como la reducción de los costos de monitoreo, cantidad de base de datos manejables, el tiempo de procesamiento de la base de datos serán más cortos, los costos serán menores en cuanto a la gestión de la información, lo que a su vez generará que los procesos de toma de decisión sean efectivos por parte de los gestores involucrados en la gestión de conflictos relacionados a la calidad de los recursos hídricos. Este último aspecto es de suma relevancia pues se han registrado, solo durante el periodo 2011-2014, 153 casos de conflictos socioambientales. De ellos, 67% están vinculados a la calidad del recurso hídrico, de acuerdo al tipo de uso de agua 105 conflictos están vinculados al uso agrario y 100 al uso minero, y pueden ser concomitantes. Asimismo, 62% de los conflictos están en relación a la disputa entre los usos minero y agrario (Defensoría del Pueblo, 2015).

La actividad minera en el Perú ha sido fuertemente impulsada desde los años 90s. Esto se evidencia en el incremento de concesiones mineras de 7,3 a 20,42% del territorio nacional entre

los años 2005 y 2014 (Preciado y Álvarez, 2016). Las actividades agropecuarias ocupan 30,1% del territorio nacional de acuerdo al IV Censo Nacional Agropecuario del 2012 (INEI, 2012). Lamentablemente, se generan tensiones entre estas actividades cuando se disputan el uso de la tierra y del agua en una misma zona. Estas tensiones se agudizan por las percepciones y desconfianzas de la población hacia las empresas mineras por los impactos ambientales del desarrollo de su actividad. Aparte de la disputa por el agua, existe el constante temor por la contaminación de los recursos hídricos y de su posible uso (Defensoría del Pueblo, 2015).

Una de las cuencas más representativas en las que se desarrollan ambas actividades (agropecuarias y mineras), que posee conflictos socioambientales principalmente relacionado a la actividad minera y, en consecuencia, la población desconfía de esta actividad y tiene el temor latente por la posible contaminación de sus recursos hídricos, es la cuenca del río Jequetepeque. En la parte alta de la cuenca se encuentra la principal minera aurífera de Sudamérica, la minera Yanacocha, y la minera Sipán que actualmente se encuentra en etapa de cierre, y en la parte baja de la cuenca se desarrolla una importante agricultura intensiva. Uno de los conflictos latentes en la cuenca del Jequetepeque es por las lagunas de Alto Perú entre la Municipalidad Provincial de San Pablo y la minera Yanacocha. El conflicto es de tipo socioambiental, pues se centra en la contaminación y deterioro ambiental en el agua, suelo y aire, el posible impacto en la salud de las personas, y las malas prácticas en la adquisición de tierras. Estas lagunas han sido designadas como Áreas de Conservación Municipal, sin embargo, son afectadas por las concesiones mineras. La población se opone al desarrollo de las actividades de exploración y a las posibles actividades mineras posteriores en esta zona, pues tienen el temor a la posible contaminación y deterioro ambiental que generará dicha actividad (GRUFIDES, 2015).

Diversos estudios en relación a la calidad del recurso hídrico se han realizado en la cuenca del Jequetepeque. Yacoub *et al.* (2013) analizaron la calidad del agua con el fin de determinar la distribución espacial y temporal de los metales trazas (Al, As, Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, Mg, Ni, Pb y Zn), y evaluar el posible riesgo en la salud humana. Determinaron que estos elementos se encontraban principalmente distribuidos en la parte alta de la cuenca, cerca de donde se desarrolla la actividad minera, y algunos de ellos fueron calificados como posibles riesgos en la salud humana. El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) en el año 2013 realizó el análisis de la calidad del agua en la cuenca obteniéndose que los metales disueltos Ni, Se, Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Fe, As, Hg, y Cr se encontraban por debajo de los límites máximos permisibles (MINAGRI, 2013). La ANA, en la actualidad, realiza monitoreos de calidad del agua de acuerdo a lo establecido en la LRH. El monitoreo de calidad del agua del año 2015 analizó parámetros físicos, químicos y biológicos obteniendo que Ca, Mn, Cu y Fe y coliformes se encontraban por encima de lo establecido en las ECAs en algunas de las estaciones de monitoreo (ANA, 2015b).

Otros autores han estudiado la salinización de los suelos en la parte baja de la cuenca vinculado a la calidad del agua disponible para riego. Corcuera (2016) evaluó el grado de salinidad de los suelos y analizó la fertilidad de los suelos para el cultivo de arroz, Jahnsen (2013) evaluó el impacto de la construcción de la represa en las tierras de cultivo por salinización, Fox (2013) evaluó la pérdida de uso del suelo por salinización entre 1980 y 2003 en el sector de San Pedro de Lloc ubicado en la parte baja de la cuenca, y Marchese (2015) estudió la salinización de los suelos agrícolas con el fin de determinar el grado de salinización. Todos estos estudios se realizaron a través del análisis de parámetros fisicoquímicos y permitieron concluir que la parte baja de la cuenca está atravesando un serio problema de salinización debido principalmente a las características físicas del suelo, al alto nivel freático y a las malas prácticas agrícolas (Fox 2013; Jahnsen, 2013; Marchese, 2015; Corcuera, 2016).

La presente tesis aplicó una metodología estadística para realizar el análisis de la eficacia de la red de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque, como herramienta de gestión de calidad de los recursos hídricos y proponerla para su aplicación a nivel nacional para otras redes similares. De esa manera, se desea contribuir con una herramienta que ayude a reducir los costos de monitoreo, el tiempo de procesamiento y análisis de los datos, lo que a su vez se traducirá en una mejor gestión de la información que facilitará la toma de decisiones de los gestores involucrados en la GCRH.

Las preguntas de investigación que se propone responder son:

¿Se puede analizar la eficacia de la red de monitoreo de calidad del agua que ha establecido la ANA en la cuenca del río Jequetepeque mediante análisis multivariado?

1.2. Hipótesis

La eficacia de la red de monitoreo de la cuenca del río Jequetepeque se puede analizar mediante las técnicas estadísticas de análisis multivariado: análisis factorial y análisis de conglomerados, con la posibilidad de reducir el número de estaciones y parámetros de calidad del agua analizados en la red.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Analizar la eficacia de la red de monitoreo de calidad de agua de la cuenca del río Jequetepeque a través de la relevancia de las estaciones de monitoreo y de los parámetros de calidad de agua mediante la aplicación de las técnicas de análisis multivariado: análisis factorial y análisis conglomerados.

1.3.2. Objetivos específicos

- Describir un procedimiento detallado de la aplicación de las técnicas estadísticas de análisis multivariado (AF y ACJ) con el fin de determinar la relevancia de las estaciones de monitoreo y de los parámetros de calidad de agua en la cuenca de estudio.
- Identificar las estaciones de monitoreo y de parámetros de calidad del agua relevantes para la red a través de la aplicación de las técnicas de análisis multivariado (ACJ y AF) a la base de datos de la ANA obtenidas de los monitoreos de calidad de agua superficial en la cuenca de estudio.
- Seleccionar las estaciones de monitoreo y parámetros de calidad del agua que presenten perfiles similares y caractericen la calidad del recursos hídrico en la cuenca.
- Comprobar que la aplicación el AF y ACJ permite reducir el número de estaciones de monitoreo y de parámetros de calidad de aguas recolectados en dicha red.



2. LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1 La calidad del agua

La calidad del agua suele definirse como la condición en la que se encuentra un cuerpo de agua disponible para un propósito en particular. La condición de un cuerpo de agua es determinada por los parámetros físicos, químicos y biológicos que describen dicho sistema. La variación de estos parámetros puede modificar la idoneidad del agua requerida para los sistemas ecológicos naturales y los posibles usos del ser humano (Boyd, 2015). Las variaciones en la calidad del agua se deben a la interrelación entre los procesos de intercambios naturales y antropogénicos. Los procesos de intercambio naturales ocurren a través del ciclo hidrológico que involucra procesos interconectados e interdependientes (García, 2006), tal como se aprecia en la figura 1.

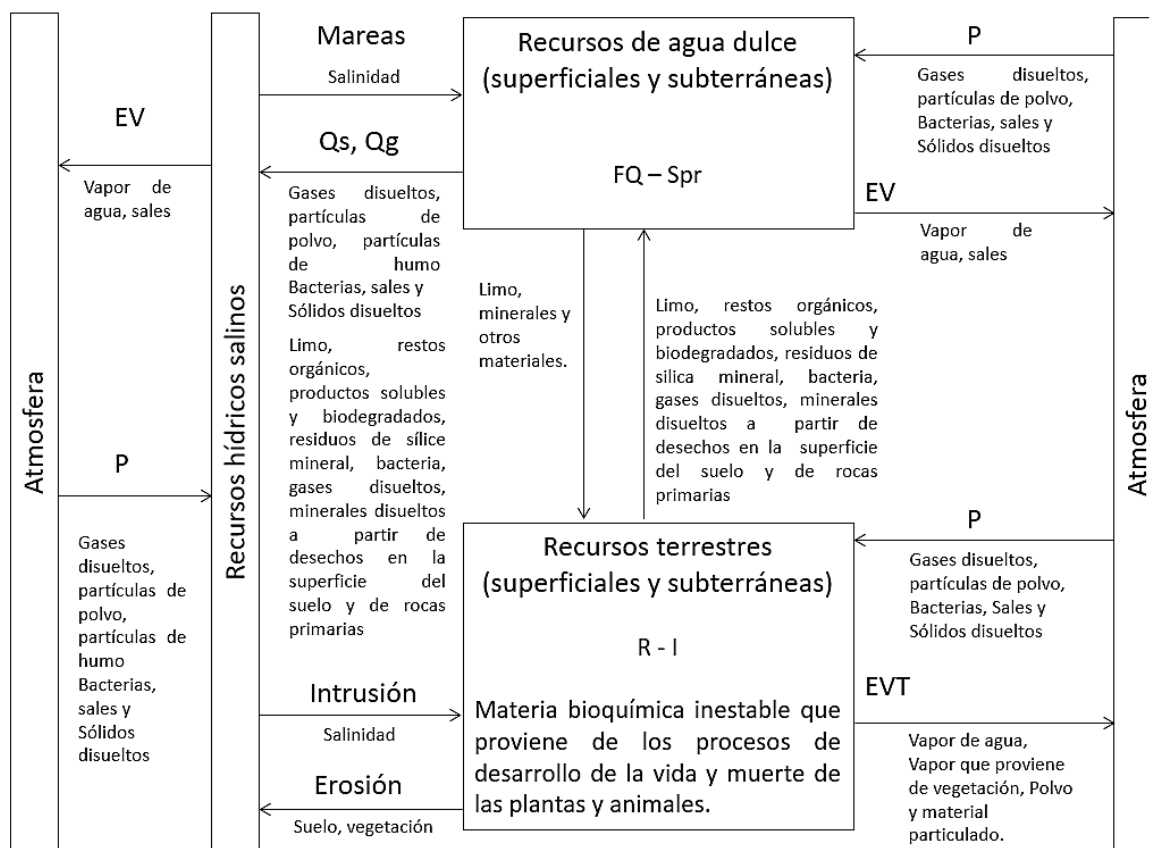


Figura 1. Procesos de intercambio natural (adaptado de García, 2006)

P = precipitación, I = infiltración, Qs = descarga de las aguas superficiales, Qg = descarga de las aguas subterráneas, Spr = manantiales, FQ = inundaciones, EV = evaporación, EVT = evapotranspiración

Los procesos de intercambio antropogénicos alteran los parámetros de la calidad del agua a través del desarrollo de las actividades humanas, las cuales incluyen el uso agrícola, extracción del recurso, construcción de centrales hidroeléctricas, etc. Estas actividades generan cambios sustanciales, tanto en el balance como en la calidad del recurso hídrico en la cuenca, pues la calidad del agua utilizada no es la misma que la del agua que regresa a la cuenca. Sin embargo, estos cambios no pueden ser considerados ni buenos ni malos, pues son parte del proceso de interrelación entre los procesos naturales y los procesos antropogénicos. Así, “si se utiliza un cuerpo de agua para la agricultura esta tendrá una calidad que probablemente no sea la adecuada para su uso industrial” (García, 2006). Los procesos de intercambio antropogénicos se muestran en la figura 2.

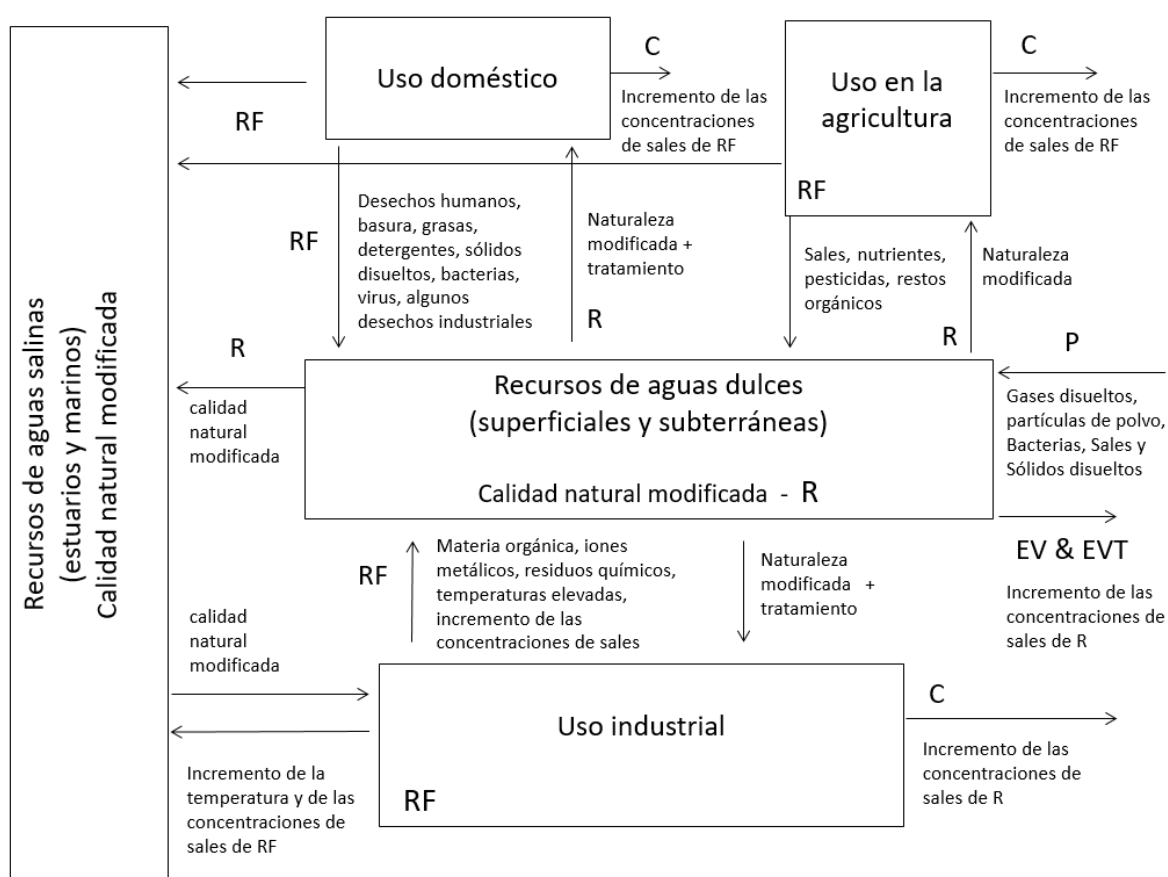


Figura 2. Procesos de intercambio antropogénicos (adaptado de García, 2006)

R = extracción de aguas de diversas fuentes, RF = aguas de descarga después de ser utilizadas, C = aguas utilizadas por procesos industriales

Por lo tanto, decir que un cuerpo de agua se encuentra contaminado significa que el uso de dichas aguas no genera un beneficio, más aún, su uso puede perjudicar a los usuarios. La contaminación

puede darse en diversos grados de importancia o magnitud debido a la variedad y cantidad de contaminantes acumulados (Pharino, 2007).

Se pueden distinguir principalmente dos tipos de fuentes de contaminación, la puntual y la no puntual. Las fuentes de contaminación puntual son aquellas que tienen un sitio de descarga definido como, por ejemplo, una tubería de descarga de una planta de tratamiento, de un sistema industrial, municipal o doméstico. El control y detección de este tipo de descargas son más fáciles de realizar que las fuentes de contaminación no puntual. Las fuentes de contaminación no puntuales provienen de descargas difusas que entran a un cuerpo de agua desde áreas muy extensas como, por ejemplo, los flujos que provienen de sistemas agrícolas, drenajes ácidos mineros, playas de estacionamientos, campos de golf, entre otros. Estas se han convertido en un serio problema pues la mayor parte de las fuentes de contaminación provienen precisamente de fuentes de contaminación no puntuales, más difíciles de detectar, medir y controlar que las fuentes de contaminación puntuales (Pharino, 2007).

2.2 Parámetros de la calidad del agua

2.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del agua influyen en los parámetros químicos y biológicos de un cuerpo de agua. Algunas de ellas se describen brevemente a continuación (Boyd, 2015; Manahan, 2011).

La **presión atmosférica**, que es la presión que ejerce la atmosfera sobre la superficie. La presión atmosférica estándar es la presión medida con un barómetro de mercurio, cuya magnitud es 760 mmHg a nivel del mar a 0°C. El barómetro es un instrumento que mide la presión que ejerce la atmosfera sobre un líquido. Se debe tener en cuenta que la presión atmosférica varía con la altura; a mayor altura, menor será la presión atmosférica.

La **temperatura** del agua es la medida de su energía interna que está relacionada con la radiación solar y la temperatura del aire, de modo que, a medida que se incrementan ambas características, se incrementa la temperatura del agua. La estratificación térmica se da por la absorción de la energía solar y varía con la profundidad del cuerpo del agua. A mayor profundidad, menor será la energía absorbida. Esto ocurre cuando la diferencia de densidad de las capas superior e inferior no permite que se mezclen por la acción del viento y, por lo tanto, las capas superiores son normalmente más calientes que las inferiores. La estratificación térmica guarda una estrecha relación con la calidad del agua pues las partículas orgánicas que se asientan en el hipolimnion (capa superior) permiten el desarrollo de la actividad microbiana causando la disminución del oxígeno disuelto y el incremento de dióxido de carbono. Por ello, las aguas que se encuentran en el hipolimnion normalmente poseen baja calidad y, si se mezclan con las capas superiores, pueden causar deterioro de la calidad del agua y hasta la pérdida de diversidad acuática.

La **cubierta de hielo** se forma debido a las bajas temperaturas registradas en ciertas zonas. Esta capa impide el contacto del aire con el agua reduciendo el intercambio de gases entre el aire y el cuerpo de agua y la penetración de luz. Como consecuencia, se reduce la fotosíntesis en el cuerpo de agua, la cantidad de oxígeno disuelto y la posible vida acuática.

La **presión de vapor** es la presión que ejerce una sustancia cuando se encuentra en equilibrio con su propio vapor. Para entender esta característica se puede imaginar un recipiente totalmente cerrado que contienen agua y aire. Las moléculas de agua entrarán en contacto con el aire hasta llegar a un equilibrio; en ese momento, la presión ejercida por las moléculas de agua que se encuentran en el aire sobre las paredes del recipiente es la presión de vapor. La presión de vapor se incrementa a medida que se incrementa la temperatura.

La **densidad del agua** es la masa de agua por unidad de volumen. Una característica importante del agua es que el hielo es menos denso que el agua líquida pues las moléculas de agua en el hielo se encuentran enlazadas de manera distinta que en el agua líquida y por ello el hielo pesa menos y flota. Asimismo, el contenido de minerales influye en la densidad; a mayor cantidad de sales a una misma temperatura, la densidad incrementa.

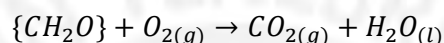
La **conductividad eléctrica** es la propiedad de una sustancia de conducir electricidad. La conductividad eléctrica del agua se favorece cuando contiene iones disueltos; a mayor concentración de iones, mayor será la conductividad.

La **transparencia del agua** hace referencia principalmente a la absorción y la dispersión de luz. En cuerpos de agua naturales, la transparencia se ve afectada por las partículas disueltas y en suspensión. En cuerpos de agua altamente transparentes gran parte de la luz es absorbida, y la fracción reflejada se conoce como albedo que es el porcentaje de luz reflejada de la luz incidente sobre una superficie. El albedo del agua usualmente es menor a 10%, por lo tanto, el agua absorbe aproximadamente 90% de luz que incide sobre la superficie. Esto indica que la superficie del agua posee una alta capacidad de retención de energía solar y la luz que penetra sobre una columna de agua tiene gran importancia en el desarrollo de la vida acuática. En cuerpos de aguas naturales, la transparencia se ve afectada por las partículas disueltas y en suspensión, por los detritos, fitoplancton, materia orgánica, etc. Los cuerpos de agua con elevada turbidez, que presenten altas concentraciones de materia orgánica y partículas en suspensión, no resultan productivos para el desarrollo de las plantas acuáticas, ni para el consumo humano.

2.2.2 Parámetros químicos

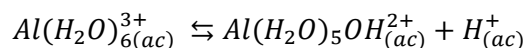
Los procesos químicos y biológicos en el cuerpo de agua son altamente complejos y más difíciles que sus propiedades físicas. Estos parámetros se describen brevemente a continuación (Boyd, 2015; Manahan, 2011).

Los principales gases disueltos en un cuerpo de agua son el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2). Estos gases provienen de la atmósfera y su disolución depende de su naturaleza química, de sus presiones parciales, de la salinidad y temperatura del agua. El **oxígeno disuelto** es esencial para la respiración y para los procesos oxidativos en un cuerpo de agua. Gran parte del oxígeno elemental proviene de la atmósfera; es importante que un cuerpo de agua entre en contacto con ella para oxigenarse. El oxígeno también es producido por la acción fotosintética de las algas durante el día, sin embargo, una parte es consumida durante la noche por las algas, por tal motivo, su contribución de oxígeno a los cuerpos de agua no es significativa. Las concentraciones de oxígeno disuelto pueden variar por diversos factores como la temperatura, procesos de oxidación de sustancias químicas y procesos biológicos. Por ejemplo, el consumo de oxígeno en la degradación de materia orgánica, representada por la fórmula $\{CH_2O\}$, se presenta en la siguiente ecuación:



El oxígeno disuelto permite la respiración de organismos acuáticos y su ausencia favorece los procesos anaeróbicos con la consecuente producción de iones ferrosos (Fe^{2+}), sulfuro de hidrógeno (H_2S), nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y otras sustancias producidas por efectos de la descomposición de materia orgánica que, en altas concentraciones, pueden llegar a ser tóxicos.

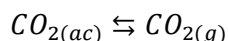
Los fenómenos ácido-base involucran la pérdida y aceptación de iones ácidos, H^+ . Existen muchas especies que liberan H^+ y actúan como ácidos, mientras que otras aceptan H^+ y actúan como bases. Una especie importante es el ion bicarbonato que puede actuar indistintamente como ácido y base; a especies que se comportan de tal manera se las denomina anfóteros. Las variaciones en el grado de acidez se deben a la presencia de ácidos débiles como el dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), ácidos grasos; y a la presencia de ácidos fuertes, como H_2SO_4 y HCl . Estos últimos, denominados ácidos minerales libres, son los más importantes contribuyentes a la acidez del agua. Por ejemplo, los drenajes ácidos de mina contienen los ácidos minerales libres en apreciables cantidades. Asimismo, algunos iones como, por ejemplo, el ión hexaaquaaluminio que proviene de vertimientos industriales como los residuos producidos del proceso de decapado de los metales, pueden contribuir a la acidez como se muestra a continuación:



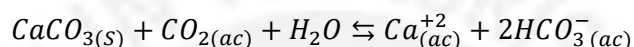
Así, el **pH** es uno de los parámetros más importantes en la calidad del agua, indica el nivel concentración del ión H^+ que, a su vez, indica el grado de acidez de un cuerpo de agua. Muchos de los procesos químicos o bioquímicos que ocurren en un cuerpo de agua dependen del pH. El pH se calcula como el logaritmo negativo de la actividad del ion ácido. En la práctica, se usa la escala de pH que varía de 1 a 14 a temperatura ambiente. Así, un cuerpo de agua es ácido si su pH se encuentra por debajo de 7; básico por encima de 7. La mayoría de los cuerpos de agua natural

poseen valores de pH en el rango de 6-9. Sin embargo, ante un alto contenido de ácidos minerales que provienen de la lixiviación de los suelos y sustancias húmicas (materia orgánica ácida), los valores de pH tienden a ser menores que, por ejemplo, en zonas con formaciones de caliza.

Otro parámetro que influye en la acidez de un cuerpo de agua es el CO_2 disuelto. Este, junto a sus productos de ionización, los iones bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}), es sumamente importante en la química del agua. El contacto del agua con la atmósfera permite la disolución del CO_2 según la reacción:



La presencia de CO_2 en los cuerpos de agua permite la disolución de minerales carbonatos, como el carbonato de calcio (CaCO_3), que se encuentran en la corteza terrestre y se produce el ion bicarbonato,

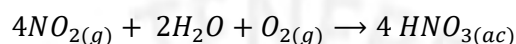
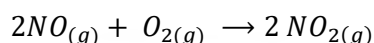
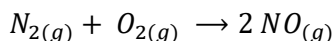


Por otra parte, un cuerpo de agua incrementa su pH, haciéndose más básico, por diversos factores como, por ejemplo, el incremento de iones carbonatos, (CO_3^{2-}) (bases). La concentración de bases expresado en carbonato de calcio (CaCO_3) se denomina **alcalinidad**. La presencia de dióxido de carbono, bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato en agua es de suma importancia pues actúan como buffers; esto significa que controlan los cambios fluctuantes en la acidez. Los cambios en el pH afectan a la comunidad biológica acuática. Por ejemplo, si ocurre una disminución en el pH, esto es, mayor acidez, se ocasiona una mayor producción de mucus, se afectan las branquias de los peces y se impide el intercambio gaseoso, lo cual lleva a la muerte del organismo. Además, elevadas concentraciones de CO_2 en un cuerpo de agua pueden tener efectos tóxicos en la respiración de los organismos acuáticos. No es recomendable que un cuerpo de agua tenga un grado de acidez muy elevado, esto es pH bajos, pues se presentan efectos corrosivos y dificulta su potabilización.

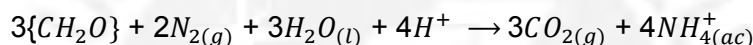
Los **sólidos disueltos** en el agua pueden ser de naturaleza inorgánica u orgánica. Están conformados principalmente carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), silicatos ($[(\text{SiO}_3)^{-2}]_n$), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}). Se considera las partículas menores a 1 μm como sólidos disueltos, por encima de dicho tamaño se denominan sólidos suspendidos. Las principales fuentes de sólidos disueltos son la disolución y la suspensión de partículas arrastradas en un arroyo o río. Otra fuente que contribuye a la concentración de sólidos disueltos en el agua son las aguas de lluvia (agua pluvial), pues contienen material suspendido en las gotas. En cuanto a la materia orgánica disuelta, estas provienen principalmente de los restos de las excretas de los animales, de los animales muertos, de las plantas y por acción de

microorganismos. Si un cuerpo de agua posee elevadas concentraciones de sólidos disueltos se puede perjudicar la existencia de algunas especies acuáticas por exceder sus límites de tolerancia.

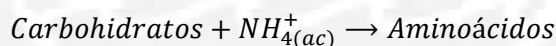
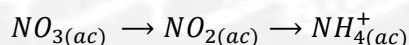
El **nitrógeno y el fósforo** son considerados nutrientes esenciales para la vida acuática. El nitrógeno atmosférico se puede fijar por acción de las descargas eléctricas, se convierte en ácido nítrico y luego cae a la superficie de la tierra a través de las lluvias. El proceso involucra primero la reacción del nitrógeno y el oxígeno para formar óxido nítrico. Luego, el óxido es oxidado a nitrito y, finalmente, este se convierte en ácido nítrico; las reacciones se muestran a continuación.



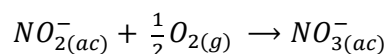
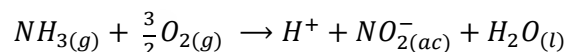
Se puede fijar por acción biológica a través de bacterias (por ejemplo, la cianobacteria), que convierten el nitrógeno en **amonio**, a través de la siguiente reacción:



Las plantas utilizan amoniaco y **nitratos** como fuentes de nitrógeno. El consumo de amoniaco requiere que los nitratos sean reducidos, por la enzima nitrato reductasa, a amoniaco que puede ser utilizado para la síntesis de aminoácidos,



El consumo de nitratos a través de la nitrificación es de suma importancia pues las plantas absorben nitrógeno principalmente como nitratos. El proceso de nitrificación es realizado por dos grupos de bacterias, *Nitrosomas* y *Nitrobacter*, en presencia de oxígeno (condiciones aeróbicas). La primera convierte el amonio en ion nitrito (NO_2^-), y la segunda convierte el nitrito en nitrato.



En condiciones anaeróbicas, las bacterias convierten el nitrato a nitrógeno gas (a este proceso se le denomina desnitrificación). Finalmente, el amonio es el principal producto de excreción de los animales acuáticos. Si un cuerpo de agua acumula una alta cantidad de amonio, la excreción de este compuesto será más difícil y causa estrés en la fauna acuática. En condiciones anaeróbicas se puede producir óxido nitroso (N_2O), el cual es un gas de efecto invernadero.

Las fuentes de **fósforo** son diversas, entre ellas: mineral apatita que contiene fosfato, sedimentos que contienen fósforo, la materia orgánica, en fertilizantes, y otros. La materia orgánica es mineralizada y absorbida por las bacterias, plantas y otros organismos. El incremento de las concentraciones de fósforo y nitrógeno favorece el crecimiento de plantas acuáticas y la eutrofización de las aguas. El proceso de la eutrofización comienza con la entrada de nutrientes (N, P) que provienen de la escorrentía o de las aguas residuales. El cuerpo de agua se enriquece en estos nutrientes y produce una gran cantidad de biomasa vegetal que se acumula en la superficie del cuerpo de agua, luego se descompone y termina por cubrir la superficie del cuerpo de agua. Este proceso ocurre naturalmente y puede ser acelerado por las actividades antropogénicas. Como consecuencia, se agota el contenido de oxígeno disuelto, se impide el paso de luz, se genera la pérdida de vida acuática, se favorecen las reacciones anaeróbicas, el crecimiento de fitoplancton y elevadas concentraciones de materia orgánica.

La presencia de **metales** (Ca, Mg, Na, K, Zn, Cu, Fe y Mn) es importante pues son micronutrientes esenciales. Su concentración se incrementa a medida que el pH decrece (mayor acidez), debido a que en esa condición se facilita su disolución. Elevadas concentraciones de estos metales pueden ser tóxicas para plantas y animales. La mayoría de los metales se encuentran en pequeñas proporciones en un cuerpo de agua por baja solubilidad. Las actividades antropogénicas son las principales fuentes de contaminación por metales. El uso de aguas contaminadas con metales puede tener diversos efectos, por ejemplo, el incremento del contenido de arsénico en las aguas puede incrementar el riesgo de cáncer tanto en animales como en humanos; bario incrementa la presión sanguínea; cadmio genera daño a los riñones al igual que el cobre que, a su vez, tiene efectos negativos en el hígado; cromo ocasiona problemas alérgicos e incrementa el riesgo de cáncer; mercurio que genera problemas neurológicos y puede causar la muerte, entre otros.

2.3 El derecho humano al agua

El agua es un recurso natural que posee tres características importantes: es esencial para la vida, es un recurso finito, y es un recurso fugaz (Van der Zaag, 2008). Posee diversos usos: agrícola, doméstico, industrial, recreación, pesca, entre otros, y es esencial para el desarrollo de las actividades económicas y la producción de alimentos (Salmón, 2014). A pesar de la importancia que tiene el agua para las personas (OMS, 2017; The Water Project, 2016), actualmente:

- existen cerca de mil millones de personas que carecen de acceso y suministro a agua de calidad,
- 84% de personas que viven en zonas rurales no tienen acceso al agua tratada,
- 80% de las enfermedades que se padecen en países subdesarrollados se debe principalmente a las pobres condiciones de saneamiento y calidad del agua,
- cerca de 443 millones de días de colegio se pierden cada año debido a enfermedades relacionadas la calidad del agua,

- dos millones de muertes anuales por enfermedades diarreicas debido al consumo de agua de mala calidad, saneamiento e higiene,
- más de 50 países aún reportan casos de cólera a la OMS, y
- un estimado de 260 millones de personas infectadas de esquistosomiasis.

Por ello, el derecho al acceso al agua de calidad es vital, cae en la categoría de derecho humano, y debería ser reconocido como tal, pues se encuentra en relación con los distintos derechos reconocidos por diversos acuerdos internacionales como el derecho a la vida, a la libertad, salud, etc. (Pinto, 2015). En el artículo 3 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos se menciona que “toda persona tiene derecho a la vida y a su seguridad” y, en el artículo 25, “toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, así como a su familia, la salud y el bienestar [...]” (ONU, 1948). La Red Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, Red-DESC, en su observación general N°15 afirma que “el derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos [...]” (Red-DESC, 2002). Menciona que el ejercicio del derecho al agua resulta adecuado si se aplican los siguientes factores: la disponibilidad, la calidad, la accesibilidad (física, económica e información) y la no discriminación del recurso. Así, el derecho humano al agua exhorta a que los estados garanticen a las personas el acceso al agua potable en suficiente cantidad y con saneamiento adecuado y que, a su vez, se proteja la calidad de los suministros del agua (UHCHR y WHO, 2010).

Por lo tanto, garantizar la calidad del agua es un eje esencial en el desarrollo y establecimiento del derecho humano al agua. Sin embargo, durante su proceso histórico, los derechos de agua se han centrado en asegurar la cantidad del recurso y muy poco en la calidad. Esto debido principalmente a que no existían métodos cuantitativos que evalúen la calidad del agua (Boyd, 2015). Pinto (2015) señala dos casos en los cuales la Comisión Interamericana de Derechos Humanos (CIDH) ha actuado, mediante sus informes, sobre algunos estados miembros en relación a la contaminación del agua que se ha generado en sus respectivos países y que ha vulnerado los derechos humanos de las personas que viven ahí. El primer caso trata sobre la contaminación de los cursos de agua que una población en Ecuador utilizaba para sus actividades de subsistencia y que ocasionó graves problemas de salud. En este caso, la comisión concluyó que el Estado debería implementar medidas en torno a la calidad del agua con el fin de que no se vean amenazadas la vida y la salud de esa población. El segundo caso, también relacionado a la contaminación del agua, ocurrió en una provincia de Argentina y los perjudicados fueron niños. La CIDH realizó una acción de amparo con el fin de proteger su salud. Como resultado, el Estado Argentino aceptó la construcción de una planta de agua potable y otras medidas sanitarias.

El 28 de julio del año 2010, la Asamblea General de la ONU emitió la resolución A/RES/64/292 en la cual se reconoce el derecho al agua potable limpia y al saneamiento como “un derecho humano

esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos” (ONU, 2010). En el año 2015, el secretario general emite el informe A/70/203 sobre el derecho humano al agua potable y el saneamiento en el cual se hace mención a las normas de derechos humanos para el saneamiento, la higiene y el agua. Para cada una de ellas se exige que se cumpla con la disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad, aceptabilidad y calidad. En relación a la calidad, las normas son (ONU, 2015):

- las instalaciones para el saneamiento e higiene deben ser inocuas, fáciles de limpiar y mantener, y deben ofrecer agua no contaminada con el fin de evitar problemas en la salud de las personas. Estas instalaciones, ya sea a través de las conexiones, letrinas o pozos sépticos, deben evitar el contacto de los humanos y animales con los excrementos, y deben ser seguras para su uso.
- la calidad del agua utilizada por las personas debe ser suficiente de tal manera que proteja su salud. Además, “se ha de prevenir, por lo tanto, la contaminación del agua por cualquier vía, incluidas la agricultura, la industria y las aguas residuales”.

La observación general N°15 del 2009 de la Convención sobre los Derechos del Niño CRC/C/GC/15 sobre el derecho del niño al disfrute del más alto nivel posible de salud, en su artículo 24 hace referencia a la resolución 64/292 de la Asamblea General y reafirma que el agua de calidad y el saneamiento es esencial para el desarrollo de los demás derechos humanos (ONU, 2013). El mismo documento señala que los Estados deben adoptar medidas en torno a la contaminación del medio ambiente local pues perjudican la salud, la crianza y el desarrollo del niño, e insta a “regular y vigilar el impacto ambiental que generan ciertas actividades empresariales y que ponen en peligro el derecho del niño, a la salud, su seguridad alimentaria, al agua potable y saneamiento”.

El 23 octubre del año 2000, el Parlamento Europeo estableció un marco de acción que debe seguir la comunidad en el ámbito de las políticas de aguas. En dicho marco se consideraron varios aspectos, entre ellos, la calidad del agua. En base a las siguientes consideraciones (DMA, 2000):

- En el punto 2, “en conclusiones del seminario ministerial sobre la política de aguas de la comunidad, en Fráncfort 1998, se puso en manifiesto la necesidad de una legislación que aborde la calidad ecológica”.
- En el punto 17, “la necesidad de una política eficaz en torno a la vulnerabilidad de los sistemas acuáticos situados cerca de las costas y los estuarios o en golfos o mares relativamente cerrados, pues el equilibrio de estas zonas depende de la calidad de las aguas continentales que fluyen hacia ellas”.

- En punto 19, se menciona que la Directiva tiene por objeto mantener y mejorar el medio acuático de la comunidad y que este objetivo está referido principalmente a la calidad de las aguas afectadas.
- En el punto 40, “en relación de la prevención y control de la contaminación, la política comunitaria de aguas debe basarse en un enfoque combinado a partir del control de la contaminación en la fuente mediante la fijación de valores límites de emisión y de normas de calidad medioambiental”.
- En el punto 42, “deben establecerse en la legislación comunitaria, a modo de requisitos mínimos, normas comunes de calidad medioambiental y valores límite de emisión para determinados grupos o familias de contaminantes”.

La Directiva adoptó diversas medidas como la que se menciona en el artículo 4 donde se señala que los estados miembros aplicaran medidas necesarias para prevenir el deterioro de las aguas superficiales, protegerlas, mejorarlas y regenerarlas con el fin de que alcancen una buena condición. En el artículo 7 se menciona que las aguas utilizadas para la captación de agua potable deben cumplir con las normas de calidad del agua establecidas previamente. El artículo 11 hace referencia a todas las medidas que serán adoptadas por los Estados miembros y, en relación a la calidad del agua, serán realizadas con el fin de cumplir con los objetivos mencionados en los artículos 4 y 5. Así, se evidencia que el marco de la Directiva Europea tiene como eje sustancial la calidad medioambiental y fija una serie de disposiciones e indicadores que permiten la evaluación y monitoreo de los Estados miembros, las cuales se observan en sus artículos 16, 17, 22 y 25 y en sus respectivos anexos (DMA, 2000).

Por otra parte, diversos países de Sudamérica han establecido lineamientos en sus políticas en torno a la calidad de los recursos hídricos. En Bolivia, la nueva constitución política del 2008 afirma en su artículo 16. I. que “toda persona tiene derecho al agua y a la alimentación”; y en el artículo 20. I. “toda persona tiene derecho al acceso universal y equitativo a los servicios básicos de agua potable, alcantarillado [...]”, y se complementa con el punto III del mismo artículo, en el cual se menciona que “el acceso al agua y alcantarillado constituyen derechos humanos, [...]”. En el título II, capítulo primero, artículo 343, se menciona que “la población tiene derecho a ser partícipe de la gestión ambiental y a ser consultada en cuanto las decisiones puedan afectar la calidad del medio ambiente”, y en el artículo 345 de la misma sección, en el segundo punto, “las políticas de gestión se basarán en la aplicación de sistemas de evaluación de impacto ambiental y de control de calidad ambiental [...]” (Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, 2009). En el reglamento de la Ley de aguas del Estado Boliviano de 1906, aún vigente, se menciona en el artículo 270 que está prohibido perjudicar la calidad de un cuerpo de agua, y que es responsabilidad del gobierno y de la policía de aguas vigilar que no se afecte la salubridad pública (Reglamento de la Ley de Aguas del Estado Boliviano, 1906).

En Ecuador, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua del 2014, menciona en su artículo 1 que “el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable”. El artículo 21 menciona que el derecho humano al agua “es el derecho de todas las personas a disponer de agua limpia, salubre, segura, aceptable, accesible y asequible para sus usos”, y que es “la Autoridad Única del Agua quien establecerá reservas de agua de la mejor calidad, las cuales se destinarán al consumo humano de la presente y de las futuras generaciones”. En el artículo 22, “toda persona tiene derecho a acceder al agua y satisfacer sus necesidades básicas [...] que se evite la contaminación y que se garantice la calidad de las reservas de agua potable”. En el artículo 24 se menciona de forma clara y contundente que “el ejercicio del derecho humano al agua implica su calidad”, y que “todos los servicios e instalaciones de agua deben ser de calidad suficiente y culturalmente adecuados, teniendo en cuenta las necesidades relativas al género, el ciclo vital y a la intimidad”. El artículo 52 hace referencia exclusivamente a la calidad del agua; se menciona que “la protección y conservación de los recursos hídricos con el fin de controlar su deterioro debe: garantizar el derecho humano al agua; garantizar el derecho a vivir en un medio ambiente sano y libre de contaminación; conservar y mejorar la calidad del agua; evitar la contaminación de aguas superficiales o subterráneas; evitar actividades que causen efectos negativos en la calidad del agua y garantizar los derechos reconocidos a la naturaleza y a las formas de vida” (Ley Orgánica de los Recursos Hídricos de Ecuador, 2014).

En Colombia, si bien no existe un reconocimiento explícito del derecho humano al agua de calidad, en el artículo 79 de su constitución se menciona que “todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano” y que es “deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente [...]”. En el artículo 80 se menciona que “el Estado deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental [...]”, y en el artículo 366, que “el bienestar y el mejoramiento de calidad de vida de la población tiene una estrecha relación con la solución de los problemas de saneamiento y agua potable” (Constitución Política De Colombia, 2015). En los artículos mencionados se observa que la calidad del agua se encuentra enmarcada en el reconocimiento implícito del derecho al agua. La Corte Constitucional de Colombia, a través de un procedimiento de amparo, ha ratificado el derecho humano al agua, lo cual se observa en sus respectivas decisiones como, por ejemplo, la decisión T-760 (2008) en la cual se señala que “toda persona tiene el derecho al disfrute del más alto nivel posible de salud y que le permita vivir dignamente”. Además, menciona que el derecho a la salud involucra el derecho al agua potable limpia y a condiciones sanitarias adecuadas (Corte Constitucional de Colombia, 2008). En cuanto a la calidad del recurso hídrico, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico del 2010, señala la necesidad de contar con mayor información sobre los parámetros de calidad del recurso hídrico que se realizan en los monitoreos y fortalecer los sistemas regulatorios sobre los vertimientos de aguas contaminadas (Ministerio de Ambiente, 2010).

En el Perú, la LRH hace referencia a la calidad del agua en varios de sus artículos y principios. Por ejemplo, el principio precautorio (principio 8 del artículo III, del título preliminar) señala que “la ausencia de certeza absoluta sobre el peligro de daño grave o irreversible que amenace las fuentes de agua no constituye un impedimento para adoptar medidas que impidan su degradación o extinción”. En el artículo 1 se menciona que el agua es un recurso indispensable para la vida, y en el artículo 3 se menciona que “es de interés nacional la gestión integrada de los recursos hídricos [...], así como asegurar su calidad fomentando una nueva cultura de agua [...]”. En el artículo 11 se menciona que es el Estado el que desarrolla y asegura la gestión integrada, la preservación de la calidad y el incremento de los recursos hídricos a través del SNGRH. En los artículos 37 y 40 se menciona que el uso del agua no debe alterar la calidad de la misma, y que el Estado debe garantizar el acceso al agua potable en cantidad y calidad suficiente para satisfacer las necesidades de las personas. Además, en el artículo 76 se menciona que “La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA) [...]”. En el artículo 97 se menciona que “la planificación del agua tiene por objetivo equilibrar y armonizar la oferta y demanda de agua, protegiendo su cantidad y calidad [...]” (Ley de Recursos Hídricos, 2009).

Finalmente, el Papa Francisco en su Carta Encíclica *Laudato Si*, capítulo primero, I. Contaminación y cambio climático, hace referencia a los efectos que tienen los contaminantes atmosféricos en el medio ambiente y en la salud de los seres humanos. En el punto II, La cuestión del agua, N°29, dice “un problema particularmente serio es el de la calidad del agua disponible para los pobres, que provoca muchas muertes todos los días [...]”; y en el N°30 menciona que “el acceso al agua potable y segura es un derecho humano básico [...]” (Francisco, 2015). De esa manera, la Iglesia Católica pone énfasis y hace un llamado de atención sobre la relevancia de establecer y realizar una adecuada GCRH en los diversos Estados de manera que se asegure el derecho humano al agua. En consecuencia, el establecimiento y la realización de la GCRH es un eje importante en el reconocimiento del derecho humano al agua tal como se aprecia en las diversas directrices internacionales, en las políticas de Estado de algunos países y en la Carta Encíclica.

La contaminación del agua es causada principalmente por el crecimiento poblacional, por las diversas actividades de desarrollo que incluyen el uso doméstico, industrial y agrícola, así como por las actividades de deforestación, producción de energía, minería y por otros factores, que incluyen, las relaciones de poder, la capacidad institucional e intereses económicos, sociales y políticos de los actores que gestionan la calidad de agua. El desarrollo de actividades como el vertimiento de aguas de uso doméstico e industriales sin el adecuado tratamiento, inapropiadas prácticas agrícolas y descarga de residuos sólidos a los cuerpos de agua tiene un alto impacto. A nivel mundial, las actividades industriales son responsables de verter aproximadamente entre 300

y 500 millones de toneladas de desechos en los cuerpos de agua cada año. El 70% de los países en vías de desarrollo, aproximadamente, vierten los desechos industriales a los cuerpos de agua sin tratamiento. Es de esperar que la inversión en proyectos para satisfacer la futura demanda de agua de calidad se incremente (UN-Water, 2011). La GCRH envuelve todos los aspectos relacionados a los problemas de la calidad del agua lo que implica que debe identificar cuál es el valor del recurso hídrico para las poblaciones y personas, establecer una serie de guías y políticas que reflejen y representen, por una parte, las relaciones y decisiones de las actividades humanas y, por otra, los aspectos relacionados a la conservación, preservación y restauración de los ecosistemas en su entorno natural (Boyd, 2015; Pharino, 2007; UN-Water, 2011).

Una adecuada gestión de calidad de los recursos hídricos requiere mecanismos o instrumentos de gestión que incluyan los procesos de toma de decisión y las actividades que se deben realizar de manera que permitan la viabilidad operativa de la GCRH. Existen diversos mecanismos o instrumentos para la GCRH, estos son los mecanismos de comando y control (C&C); la construcción de consensos sociales; los instrumentos de gestión económica; y los mecanismos de adhesión voluntaria (Porto y Lobato, 2004a, 2004b). De todos ellos, el mecanismo de comando y control es el más utilizado para reducir la contaminación de los recursos hídricos.

2.4 Mecanismo de comando y control

Se denomina comando y control porque el mecanismo se centra en el control sobre los contaminadores. Debido a que la calidad del recurso hídrico es el resultado de las diversas interacciones entre la naturaleza y las diversas actividades humanas, que tienen múltiples agentes sociales, el control sobre todos los contaminadores es una acción muy difícil de realizar. Entonces, es necesario comandar todos los factores relacionados a los objetivos deseados en cuanto a la contaminación del recurso, lo que implica el desarrollo de políticas y leyes que permitan la aplicación de multas y sanciones. Por ello, estos mecanismos son aplicados normalmente por el poder público y son de carácter obligatorio. El enfoque principal de este mecanismo se centra en la calidad que se desea que tenga un cuerpo de agua y, para ello, los residuos y contaminantes generados por las actividades humanas se deben producir dentro de los límites ambientales sostenibles. El mecanismo de comando y control funciona además como mecanismo regulatorio, pues si no hubiera la acción de este mecanismo es muy probable que las actividades productivas tiendan a tener un comportamiento depredador. (Porto y Lobato, 2004a)

El procedimiento del mecanismo de comando y control se centra en la identificación de las fuentes de contaminación, disponer de estándares de emisión y de permisos que cumplan con los requerimientos de contaminación para las diversas actividades productivas (Perman *et al.*, 2003; Porto y Lobato, 2004a). Este mecanismo posee una serie de instrumentos como se muestra en la tabla 1. En la figura 3 se aprecian las relaciones entre un proceso industrial y los niveles de contaminación generados por este. La cantidad de emisión dependerá principalmente del producto,

del volumen de producto, de las tecnologías utilizadas, de los insumos y de la capacidad del personal. En el caso de que existan contaminadores que emitan diferentes tipos de contaminantes a distintos niveles, la distribución espacial de los niveles de contaminación dependerá de la ubicación de las fuentes de emisión (Perman, 2006). Por esa razón, se requiere que se definan los estándares de calidad del agua. Estos estándares son el eje central del mecanismo de comando-control y el monitoreo constante de estos estándares evalúa el progreso del mecanismo (Porto y Lobato, 2004a).

Tabla 1. Instrumentos de comando y control

Instrumento	Descripción
Controles de entrada sobre la cantidad y mezcla de insumos	Requisitos para utilizar un insumo en particular que puede generar una gran contaminación.
Controles tecnológicos	Requisitos tecnológicos son impuestos a los contaminadores para que utilicen tecnologías particulares que generen menor contaminación
Controles de salida: Cuotas de salida o prohibición	Límites no transferibles en salidas de productos.
Licencias de Emisión	Estas Licencias no son transferibles. Significa que cada contaminador tiene una licencia en el cuál figura la máxima cantidad de emisión permitida.
Control de las ubicaciones	Regulaciones relacionadas a las ubicaciones. Esto implica las fuentes de contaminación, las personas que van a recibir la contaminación, y las posibles reubicaciones de las personas o de las fuentes.

Fuente: Tabla adaptada de Perman *et al.* 2003.

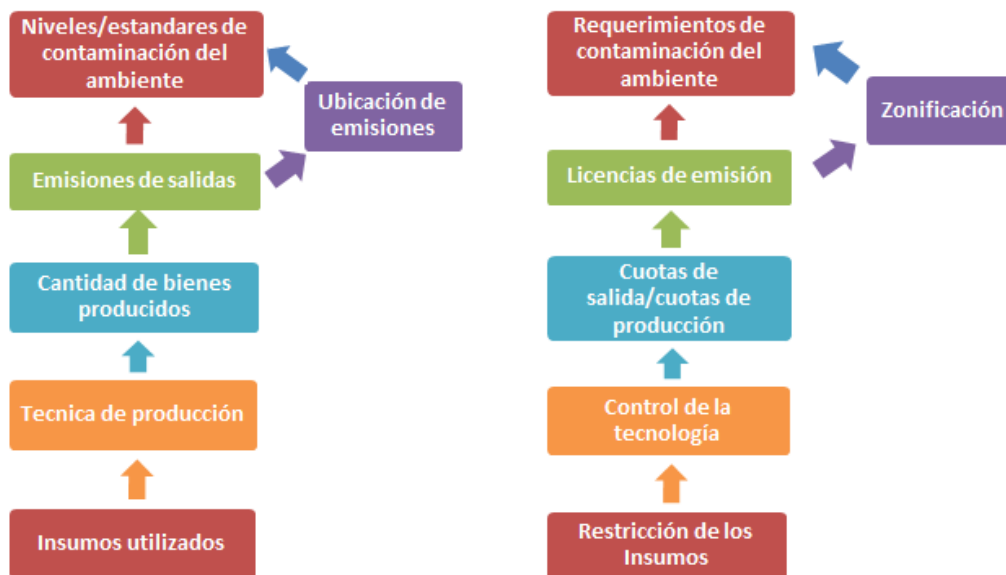


Figura 3. Implementación de los instrumentos de comando y control en un proceso productivo (Fuente: adaptada de Perman *et al.* 2003)

Existen dos tipos de estándares, los de calidad ambiental del agua (ECA) y los de emisión o límites máximos permisibles (LMP). Los ECA son valores que indican la concentración de elementos o sustancias en un cuerpo de agua y son específicos para cada uso. Si se superan los ECA, se puede afectar significativamente el cuerpo de agua. Es por esta razón que los ECA se utilizan para establecer políticas públicas ambientales (Perman *et al.*, 2003; Porto y Lobato, 2004a). Estos estándares no se enfocan en medir las emisiones de un agente en particular, sino buscan establecer un nivel aceptable para las emisiones realizadas por todos los agentes de la zona. Por tal motivo, la medición suele realizarse en los cuerpos receptores. Los LMP son valores que expresan el límite de un cierto contaminante en una emisión, efluente o descarga en el cuerpo de agua producidos por agente en particular (Porto y Lobato, 2004a). Estos estándares miden la concentración de ciertos elementos o sustancias en base a sus características físicas, químicas y biológicas en dichas emisiones. El objetivo de este tipo de estándares es limitar la cantidad de contaminantes que generan una actividad en particular. La mayor eficiencia del mecanismo comando y control se logra al aplicarse en conjunto ambos tipos de estándares y, para ello, se requiere que se implementen redes de monitoreo y se realicen monitoreos adecuados y de manera continua (Perman *et al.*, 2003; Porto y Lobato, 2004a).

Para cumplir con los estándares de emisión, los agentes contaminadores deben utilizar tecnología adecuada para tratar sus efluentes, y existen tres categorías (Porto y Lobato, 2004a):

- La **mejor tecnología disponible**, se refiere a que el contaminador tratará sus efluentes con la mejor tecnología disponible en ese momento, pues el énfasis se encuentra en realizar la mayor reducción de carga de contaminante.
- La **mejor tecnología**, se refiere a que el contaminador removera la contaminación utilizando la técnica usual que utiliza el sector teniendo en cuenta los usos y costumbres del sector.
- La **mejor tecnología práctica**, se refiere a que el contaminador utilizará la mejor tecnología de acuerdo a sus costos de producción.

Para una adecuada aplicación del mecanismo es recomendable iniciar con la implementación de la mejor tecnología práctica, luego utilizar la mejor tecnología convencional y, finalmente, la mejor tecnología disponible. Esto se debe a los costos que involucran cada una de las tecnologías. Por ello, se recomienda uniformizar el uso de una tecnología en particular para todos los contaminantes (Porto y Lobato, 2004a). Una las principales ventajas de utilizar la misma tecnología para el tratamiento de todos los contaminantes es que permite una cierta equidad económica en relación a los gastos que involucra la reducción de la contaminación. Cabe señalar que dicha operación debe darse para todos los agentes que produzcan el mismo bien. De esa manera, el costo de tratamiento para todos los agentes será el mismo y solo dependerá del proceso y cantidad de producción (Porto y Lobato, 2004a). Sin embargo, entre las principales desventajas que existen en la uniformidad tecnológica se encuentran los gastos excesivos de recursos por parte del controlador y la categorización de estándares de emisión por categorías industriales de acuerdo a la tecnología utilizada. Esto requiere un enorme esfuerzo por parte del ente regulador, tanto a nivel económico como a nivel de capacidad personal (Porto y Lobato, 2004a).

Una de las principales debilidades del mecanismo es la rigidez de los estándares (ECA y LMP) pues no consideran la dinámica de los cuerpos de agua. La acción del mecanismo debe ser flexible y descentralizada a nivel local (Porto y Lobato, 2004a). Este mecanismo requiere de bases de datos y de modelos computacionales. Para ello se requiere establecer adecuadas redes de monitoreo y realizar un monitoreo constante de los parámetros de calidad de agua. Sin embargo, en Latinoamérica existen dificultades en torno a la operatividad de los programas de monitoreo de calidad de aguas (Biswas *et al.*, 2006). Además, para una operación satisfactoria de las licencias de emisión se tienen que conocer las fuentes de emisión (puntual y no puntual), realizar el monitoreo constante en dichas fuentes, conocer el proceso de producción del agente productivo y contar con una penalidad fuerte para que se cumplan las exigencias de las licencias (Porto y Lobato, 2004a). Dado que en la cuenca se tiene más de un contaminante, el organismo controlador deberá conocer los costos que involucran la disminución de la contaminación de cada una de las empresas para que se establezca la igualdad de los costos entre ellos, y debe contar con la información de los niveles de contaminación de cada agente contaminante y de los costos que generan la disminución del mismo. Sin embargo, debido a la falta de información, los costos son muy elevados y las capacidades en muchas ocasiones no son las óptimas (Porto y Lobato, 2004a).

El uso de tecnologías por parte del contaminador debe estar orientado al beneficio del cuerpo receptor. Esto requiere información precisa y un monitoreo constante de las emisiones. Además, muchas de ellas se utilizan basadas únicamente en el menor costo y beneficio económico para el agente contaminador (Perman *et al.*, 2003).

Otro de los problemas del mecanismo es que disminuye la probabilidad de inducir al agente contaminador a reducir la mayor cantidad de contaminantes, pues las tecnologías utilizadas suelen ser específicas para unos cuantos contaminantes. Por tal motivo, es necesario la articulación de otros instrumentos de gestión para incentivar al agente contaminador a disminuir su contaminación.

2.5 Diseño de una red de monitoreo y su importancia en la GIRH

El establecimiento de programas de monitoreo de calidad de los recursos hídricos permite obtener información sobre las influencias naturales y antropogénicas en el cuerpo de agua monitoreado, y así, facilitar los procesos de toma de decisión de los gestores involucrados en el desarrollo de una eficiente GCRH. Estos programas involucran un conjunto de actividades las cuáles se aprecian en la **figura 4** (Harmancioglu *et al.*, 1999).

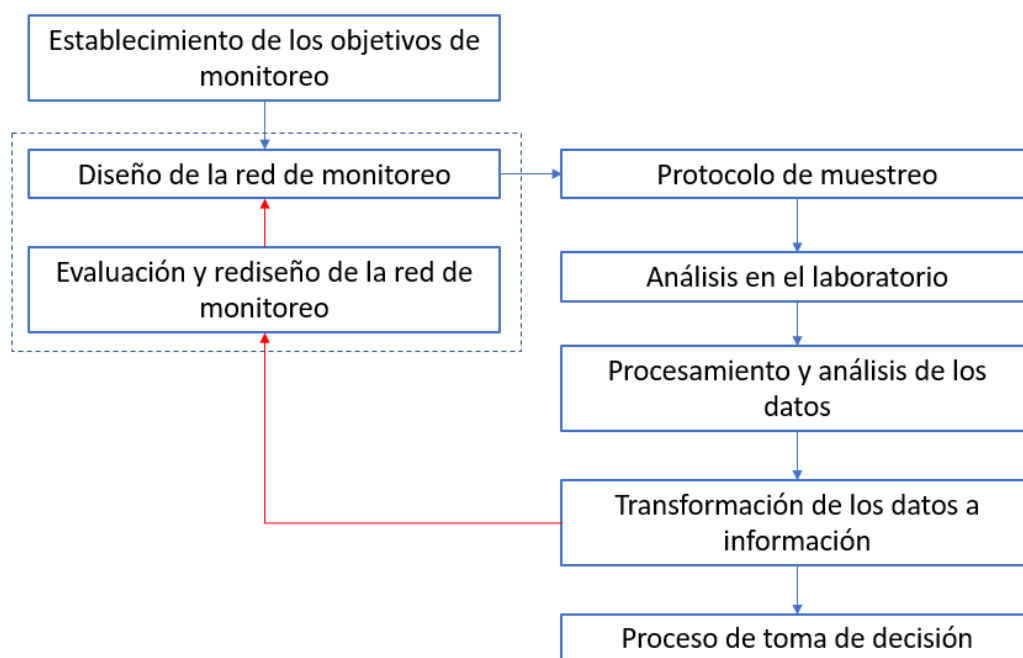


Figura 4. Programa de monitoreo de calidad del agua (adaptado de Harmancioglu *et al.*, 1999)

De ahí que, el establecimiento de redes eficientes de monitoreo de calidad de agua es un componente crítico para la GCRH y la evaluación de las redes de monitoreo debe ser obligatoria

con el fin de que la recolección de datos, el posible rediseño de la red y la toma de decisiones por parte de los gestores, ocurran de manera óptima (Harmancioglu *et al.*, 1999). Sin embargo, no existe una guía universal que permitan evaluar las características de las redes de monitoreo, pues es imposible contar con una guía que se adapte a las necesidades que se requieran evaluar en cada cuerpo de agua en los diferentes países (Khalil y Adamowski, 2013).

El diseño de las redes de monitoreo involucra la selección de las estaciones de monitoreo, los parámetros a muestrear y la frecuencia de muestreo en un área determinada. La selección de las estaciones de monitoreo es el paso inicial y el más importante en el diseño de una red de monitoreo (Harmancioglu *et al.*, 1999). Las estaciones deben distribuirse en toda la cuenca y en las áreas de interés de acuerdo a los objetivos de monitoreo establecidos previamente. Estas estaciones deben ubicarse cerca de las fuentes de contaminación y deben ser de fácil acceso para los profesionales que ejecuten el muestreo. Existen distintas metodologías para la asignación y distribución de las estaciones de monitoreo en una cuenca, una de ellas es la desarrollada por Sanders *et al.* (1983) basado en el procedimiento desarrollado por Horton (1945) y Strahler (1952, 1957). El método consiste en asignar un orden a cada tributario al río principal, se asigna el orden uno a aquel que no posea ninguna ramificación, luego se asigna el orden dos al tributario que solo reciba las contribuciones de los tributarios que posean el orden uno, y así sucesivamente hasta llegar al río principal. Adicionalmente, se asignan estaciones en donde se encuentren descargas de contaminantes puntuales, luego todas las estaciones deben ser evaluadas de acuerdo a los objetivos del monitoreo y a la accesibilidad para realizar el muestreo (Harmancioglu *et al.*, 1999; Horton, 1945; Strahler, 1952, 1957).

La selección de los parámetros a muestrear depende de los objetivos y de las restricciones económicas de cada monitoreo. Por ejemplo, si el objetivo del monitoreo es determinar la influencia de la actividad minera en la calidad del agua en una cuenca, entonces se analizará principalmente metales pesados que provienen de las descargas de la actividad (Borden y Roy, 2015). Debido a que no se puede seleccionar a todos los parámetros a muestrear, algunos estudios utilizan técnicas estadísticas para determinar que parámetros muestrear, otros agrupan a los parámetros de acuerdo a la información que deseen obtener en cada estación, a las características de la cuenca o a los impactos ambientales observados en ella (Harmancioglu *et al.*, 1999).

La frecuencia de muestreo es otro de los aspectos relevantes en el diseño de las redes de monitoreo, pues si se muestrea muy seguidamente la información que se obtiene de los monitoreos puede ser redundante y, por el contrario, puede dejarse pasar información relevante sobre la calidad del cuerpo de agua. El análisis de frecuencias de muestreo requiere base de datos de monitoreos realizados durante varios años (Khalil y Adamowski, 2013), se realiza únicamente por análisis estadístico y debe ser aplicada a la base de datos de cada estación de monitoreo en particular y a la base de datos de todas las estaciones de monitoreo en conjunto. Algunos de los

beneficios que permite el análisis de las frecuencias de muestreo son: la evaluación de tendencias anuales, la estimación del transporte de masa, la evaluación de impacto ambiental y el cumplimiento de los estándares de calidad del agua (Harmancioglu *et al.*, 1999).

La evaluación de una red de monitoreo debe realizarse cada cierto tiempo con la finalidad de evaluar el funcionamiento del programa de monitoreo establecido, la eficiencia, eficacia y el posible rediseño de la red en base a nuevos objetivos de monitoreo. La evaluación y el rediseño de la red requiere el análisis de los tres aspectos involucrados en el diseño de las redes de monitoreo: las estaciones de monitoreo, los parámetros a muestrear y las frecuencias de muestreo. En la actualidad, estos aspectos son estudiados a través de varios métodos estadísticos (Khalil y Adamowski, 2013; Kim *et al.*, 2017; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005). Las estaciones de monitoreo están siendo analizadas a través del análisis de la regresión, del concepto de entropía y mediante el análisis multivariado (Harmancioglu *et al.*, 1999; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005); para el análisis de los parámetros a muestrear se han propuesto principalmente dos técnicas estadísticas: el análisis de correlación-regresión y el análisis factorial (Khalil y Adamowski, 2013; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005); y para el análisis de las frecuencias de muestreo, se emplea el análisis de regresión lineal, de las autocorrelaciones a través de semivariogramas, de series de tiempo, y de intervalos de muestreo a través del concepto de entropía (Harmancioglu *et al.*, 1999; Khalil y Adamowski, 2013; Khalil *et al.*, 2014).

Por otra parte, la GIRH es definida como “un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra, y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (GWP, 2011). Debido a la naturaleza del recurso hídrico, la GIRH considera cuatro dimensiones: los recursos hídricos en si mismos, los usuarios del agua, las escalas espaciales y las escalas temporales (Van der Zaag, 2008).

La primera dimensión está relacionado a todos los aspectos de los recursos hídricos, ya sea en cantidad y calidad del recurso, en el almacenaje, en la distinción entre las aguas de lluvia con los lagos y las aguas subterráneas, tomando en cuenta todo el ciclo hidrológico. La segunda dimensión abarca a todos los actores en la cuenca. Estos tienen diferentes funciones en la cuenca, ya sean funciones productivas (relacionado a las actividades productivas), de regulación (relacionado a la capacidad de mantener el equilibrio dinámico de los procesos naturales), de sostenimiento (relacionado al mantenimiento de las formas de vida), y de transferencia (relacionado a la contribución de la cultura, religión o cosmovisión de la cuenca). Cada una de estas funciones están relacionadas a la cantidad y calidad del recurso. La tercera dimensión, las escalas espaciales, se refiere a los niveles que abarca la gestión de los recursos hídricos. Estos niveles pueden ser geopolíticos: nacional, regional, distrital o local; e hidrográficas: cuencas, subcuencas y microcuencas, que rara vez coinciden con los niveles geopolíticos, generando

problemas en la gestión del recurso. La cuarta dimensión esta relacionada a las escalas temporales variables en los usos del agua, ya sea por los distintos tipos de uso del agua o por las variaciones de las demandas en el tiempo (Van der Zaag, 2008).

Existen tres principios claves en la GIRH: la Equidad, la Integridad Ecológica y la Eficiencia. La equidad se relaciona al hecho que el agua sea considerada bien público y derecho humano. La integridad ecológica se refiere al uso sostenible del recurso, de manera que se conserven los ambientes que generan agua de calidad necesarios para los usos actuales y futuros. La eficiencia abarca todas las actividades y arreglos institucionales que promueven el uso eficiente del recurso (Van der Zaag, 2008).

Por lo tanto, la gestión de los recursos hídricos radica en encontrar soluciones adecuadas basadas en los principios y dimensiones de la GIRH (Van der Zaag, 2008). Para ello, la gestión de los recursos hídricos se realiza en base a los aspectos básicos del ciclo de gestión: la planificación, la ejecución, el monitoreo y evaluación, y la operación y mantenimiento. De todos ellos, la planificación es el paso más importante en el desarrollo de la GIRH pues debe considerar los aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales que se desarrollan en la cuenca, y de no realizarse de manera adecuada, el ciclo de gestión se extiende durante varios años. La planificación es una actividad sistemática que permite determinar el momento óptimo para realizar las diferentes actividades con los recursos necesarios con la finalidad de lograr los objetivos de gestión. Esto significa que la elaboración de planes de gestión de los recursos hídricos debe considerar los aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales relacionados a la GIRH. El desarrollo de estos planes de gestión debe ser participativo de manera que las decisiones que se tomen reflejen las necesidades y la situación real de la cuenca (Doornbos, 2008).

La planificación hídrica es un proceso que puede ilustrarse a través de un ciclo continuo que comienza con la **formación de un equipo de trabajo** y el compromiso de cada miembro del equipo, de los interesados y del gobierno o autoridad encargada de ejecutar la GIRH. Es importante el compromiso de los interesados pues ellos son los que tienen una influencia significativa en los procesos de gestión del recurso hídrico. Luego, se establece **la visión del plan** en base a las aspiraciones que se desea alcanzar con la aplicación de la GIRH en el país. Esta visión debe ser la guía para las acciones y el proceso del planeamiento de la GIRH. Seguidamente se requiere realizar el **análisis de la situación** existente en la cuenca. Esto va a permitir evidenciar las necesidades y los problemas relacionados con el agua y, por tal motivo, es importante q se realice basadas en la consulta de los actores y de las entidades gubernamentales involucradas en la gestión del recurso. Como resultado se debe obtener las metas de la planificación claramente definidas. En base a estas metas se elaboran las **estrategias de gestión del recurso**, las cuáles deben plasmar las soluciones para cada meta de gestión. Estas estrategias deben ser evaluadas en base a las ventajas y desventajas de su aplicación, y a su factibilidad. De los resultados

obtenidos en las etapas anteriores se elabora el **plan de GIRH**. Este plan establece las actividades, el presupuesto y los consensos entre los actores en la cuenca. El plan debe ser aprobado por el gobierno para comenzar con su **implementación**. En caso que los resultados obtenidos de la ejecución de los planes no cumplan con los objetivos esperados de la GIRH, se requiere la **evaluación del plan** (Doornbos, 2008). El proceso completo de planificación hídrica se muestra en la figura 5.

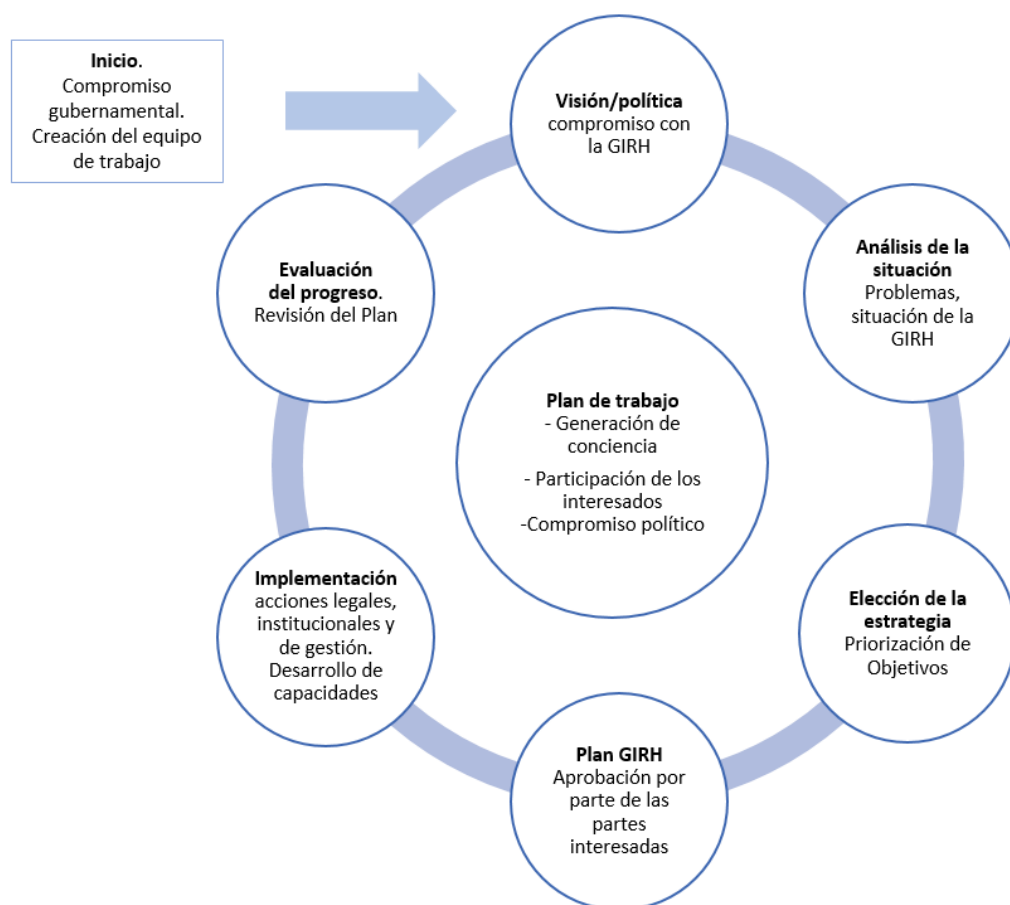


Figura 5. Ciclo para desarrollar un plan de GIRH (Adaptado de Doornbos, 2007)

En el Perú, la planificación de la GIRH ha producido distintas políticas públicas como, por ejemplo, la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos, el Plan Nacional de los Recursos Hídricos y los Planes de Gestión de Recursos Hídricos de Cuencas. Estas políticas sientan las bases y establecen los objetivos para el desarrollo y realización de la GCRH. En base a dichas políticas se ha elaborado el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. Este tiene como objetivo principal “estandarizar los criterios y procedimientos técnicos para evaluar la calidad de los recursos hídricos, continentales y marino-costeros considerando el diseño de las redes puntos de monitoreo, la frecuencia, el programa analítico, la medición de parámetros en campo, la recolección, preservación, almacenamiento, transporte de

muestras de agua, el aseguramiento de la calidad, la seguridad del desarrollo del monitoreo” (ANA, 2016c). El diseño de este programa de monitoreo se ha basado en guías internacionales como las guías de muestreo de calidad de agua de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), las guías de diseño de redes de monitoreo, muestro, y establecimiento de estándares de calidad del agua de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés).

La evaluación de las redes de monitoreo resulta esencial en el desarrollo de los programas de monitoreo. Estos programas son el resultado de la ejecución del ciclo de planificación y normalmente se encuentran como parte de los objetivos de los planes de GIRH. La no ejecución de la evaluación de las redes de monitoreo evidencia una debilidad en el desarrollo de la planificación de la GIRH y, por lo tanto, es importante que sea considerada en las políticas públicas relacionadas a la gestión del recurso con el fin de garantizar su sostenibilidad.

2.6 Aspectos legales e instrumentos de gestión de calidad de los recursos hídricos

La Constitución Política del Perú señala en el artículo 66° que “los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación”, que el “Estado es soberano en su aprovechamiento” (Congreso Constituyente del Perú, 1993). De ahí que, el Estado debe proveer una legislación que permita una adecuada gestión del agua, al ser esta un recurso natural. Dicha gestión debe considerar los usos del agua, la conservación, protección y tratamiento de la misma. Estos aspectos hacen referencia directa a la necesidad de gestionar la calidad del agua. Para ello se cuenta con un marco legal en las que se encuentran leyes, reglamentos y decretos supremos relacionados a la gestión del agua.

El Acuerdo Nacional consiste en una serie de políticas que definen lineamientos generales y que buscan una gobernabilidad democrática del país a largo plazo. Estas políticas se encuentran agrupadas en cuatro objetivos principales: democracia y estado de derecho; equidad y justicia social; competitividad del país; y, estado eficiente, transparente y descentralizado. En este último objetivo se encuentra la política N°33 referente a los recursos hídricos. En dicha política se mencionan los objetivos y principios para promover el uso, conservación y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, y establecer sistemas de gobernabilidad que permitan la participación informada, efectiva y articulada de todos los actores que intervienen en su gestión. Para lograr ello, el Estado debe seguir quince lineamientos. Asimismo, se menciona que el Estado debe garantizar el abastecimiento de agua en cantidad, calidad, oportunidad para consumo humano y para la seguridad alimentaria, protegiendo el equilibrio del ciclo hidrológico y la calidad de los cuerpos de agua. El manejo del agua se debe realizar a través de la cuenca y las diversas actividades humanas que se desarrollen en ella deben ser gestionadas. El Estado debe garantizar la formalización de los derechos de usos de agua, la aplicación de medidas necesarias para que los

actores que participan en la cuenca protejan, rehabiliten y compensen los impactos sobre el recurso hídrico. Otro aspecto es que el Estado debe fortalecer los procesos de gestión de tal manera que permitan la protección y ordenamiento de las cuencas, recuperar la calidad del agua en las mismas, fiscalizar los usos y vertimientos en los cuerpos de agua y crear condiciones para garantizar la sostenibilidad del reuso y reciclaje del recurso. Finalmente, se pone énfasis en la transparencia de la información de los recursos hídricos, tanto en cantidad, calidad y gestión que se realiza de la misma, la cual debe ser realizada a través de la ANA (Acuerdo Nacional, 2002).

Para realizar los lineamientos mencionados en la Política 33 del Acuerdo Nacional, el SNGRH cuenta con cuatro instrumentos de planificación: el Plan Nacional del Ambiente (PNA), la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (PENRH), el Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) y los planes de gestión de recursos hídricos de cuenca. Es importante señalar que cada instrumento se enmarca en uno superior tal como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Instrumentos de planificación de los recursos hídricos (adaptada de Política 33 - Acuerdo Nacional)

2.6.1 Política Nacional del Ambiente (PNA)

Esta política es un instrumento de gestión que define los objetivos prioritarios, lineamientos, contenidos y estándares nacionales de obligatorio cumplimiento. El objetivo general es “mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, viables y

funcionales en el largo plazo; y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes [...]”. Para lograr este objetivo, la política considera cuatro ejes de gestión ambiental (MINAM, 2009):

1. Conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y de la diversidad biológica.
2. Gestión integral de la calidad ambiental
3. Gobernanza ambiental
4. Compromisos y oportunidades ambientales internacionales.

El eje de política 1 considera, entre otros lineamientos, impulsar la gestión integrada de cuencas con un enfoque ecosistémico, la formulación de estándares de evaluación y monitoreo de los recursos hídricos, la caracterización, evaluación y registro de los suelos, y promover acciones para consolidar los derechos de uso de los recursos hídricos con el fin de conservar y aprovechar de manera sostenible los recursos.

El eje de política 2 menciona la necesidad de integrar mecanismos para el control de la contaminación, contar con parámetros para el control y mantenimiento de la calidad del agua, realizar acciones para recuperar la calidad del agua, y promover la inversión privada para la utilización de tecnologías limpias, y gestión ambiental ecoeficiente tanto por entidades públicas y privadas.

El eje de política 3 posiciona el tema ambiental en las decisiones de Estado promoviendo la participación ciudadana con el fin de lograr un sistema de gestión ambiental que funcione en todos los niveles y construya nuevos modos de vida basados en los principios de sostenibilidad, inclusión social, ética y justicia ambiental.

Finalmente, el eje de política 4, busca lograr el cumplimiento de los acuerdos internacionales de tal manera que contribuyan al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, asegurar que las posiciones nacionales en el tema ambiental presentadas en foros internacionales contribuyan a las decisiones en torno a la gestión ambiental, y que los procesos de integración comercial homogenicen criterios y estándares de tal manera que se mejore la gestión ambiental.

2.6.2 Política y estrategia nacional de los recursos hídricos

La PENRH, aprobada el 11 de mayo del 2015, es un instrumento conceptual de planificación que define los objetivos de interés nacional para garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos del país. Este instrumento tiene como objetivo general “lograr la gestión integral de los recursos hídricos en el ámbito nacional que permita satisfacer las demandas presentes y futuras, así como garantizar la conservación, la calidad, y la disponibilidad del recurso hídrico y su aprovechamiento eficiente y sostenible [...]”. La PENRH tiene cinco ejes de políticas y estrategias de intervención (ANA, 2015a), los cuales son:

1. Gestión de la cantidad
2. Gestión de la calidad
3. Gestión de la oportunidad
4. Gestión de la cultura del agua
5. Adaptación al Cambio Climático y Eventos Extremos.

En cuanto a la GCRH se menciona que esta se encarga de “promover la protección y recuperación de la calidad de los recursos hídricos en las fuentes naturales y ecosistemas relacionado a los procesos hidrológicos”. Para ello, el eje de política 2 tiene dos estrategias de intervención con sus respectivos lineamientos tal como se muestra en la tabla 2.



Tabla 2. Estrategias de intervención con sus respectivos lineamientos en torno a la gestión de calidad de los recursos hídricos

Estrategia	Lineamientos
Fortalecer las acciones sectoriales y multisectoriales en materia de gestión de la protección del agua	<p>Integrar y articular la normatividad sectorial y multisectorial para su cumplimiento en materia de calidad de agua</p> <p>Actualizar los estándares nacionales de la calidad ambiental del agua, y de los límites máximos permisibles, para efluentes de actividades poblacionales y productivas en coordinación con las instituciones o sectores competentes.</p> <p>Promover acciones de carácter multisectorial y participativo en previsión a posibles conflictos vinculados a la calidad del agua</p> <p>Adecuar e implementar, progresivamente, instrumentos de gestión ambiental que permitan el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad ambiental para agua y límites máximos permisibles.</p> <p>Impulsar la formalización del derecho de uso de agua de las actividades productivas y poblacionales que generan impactos en la calidad de las fuentes naturales del agua</p> <p>Aplicar medidas de estímulo o sanción para preservar la calidad del agua en sus fuentes naturales y bienes asociados.</p>
Mantener y/o mejorar la calidad del agua en las fuentes naturales continentales y marítimas y en sus bienes asociados	<p>Formular e implementar planes y programas para el mejoramiento de la calidad del agua en las unidades hidrográficas y marino costeras.</p> <p>Promover la implementación de una red nacional de laboratorios acreditados para el análisis de agua.</p> <p>Fortalecer la vigilancia y monitoreo de la calidad del agua en fuentes naturales de agua.</p> <p>Fortalecer la fiscalización y vigilancia de los vertimientos de aguas residuales, priorizando los provenientes de origen doméstico urbano rural.</p> <p>Identificar e inventariar participativamente, bajo la conducción de la ANA, las fuentes contaminantes de los cuerpos naturales de agua.</p>

	<p>Implementar acciones para el control del uso de sustancias peligrosas en actividades productivas y poblacionales que pongan en riesgo la calidad del agua</p> <p>Promover, en coordinación con los sectores competentes, la aplicación de incentivos para el tratamiento de las aguas residuales generadas por las actividades productivas</p> <p>Formular e implementar, coordinación con los sectores competentes, medidas para la gestión de residuos sólidos, a fin de proteger fuentes naturales de agua.</p> <p>Desarrollar investigación destinada a mejorar la calidad del agua, mediante la aplicación de nuevas y/o mejores tecnologías</p> <p>Formular e implementar medidas, en coordinación con los sectores competentes, para la remediación de los pasivos ambientales que impactan en las fuentes naturales de agua en cuencas priorizadas.</p>
--	--

Fuente: Adaptado de DS006-2015-MINAGRI.

2.6.3 Plan Nacional de Recursos Hídricos

El PNRH es un instrumento de planificación que contiene toda la información necesaria para cumplir con los objetivos establecidos en el PENRH. Este instrumento ha sido formulado por la ANA y tiene como objetivo principal “determinar las medidas que permitan resolver los problemas del agua en el Perú, establecer costos y fuentes de financiación, así como los programas de implementación de estas” conforme a los artículos 97 y 100 de la LRH (ANA, 2013).

El PNRH utiliza los instrumentos de planificación enmarcados en la LRH que se orientan a conseguir los objetivos del PENRH. En cuanto a la GCRH, el PNRH, en su eje de política 2: Gestión de calidad del agua, tiene como objetivos:

- Promover la mejora del conocimiento de calidad de aguas, su recuperación y protección
- Establecer vigilancia, fiscalización y mitigación de fuentes contaminantes.
- Mejorar y ampliar la cobertura de los servicios de saneamiento.

Para lograr estos objetivos, la política de gestión de la calidad de agua establece que se debe implementar redes de monitoreo, protocolos de muestreo y promover la acreditación de la red de laboratorios (PNRH). Sin embargo, en el documento no se menciona el análisis y evaluación del funcionamiento de las redes de monitoreo y tampoco se encuentra implementado en el PNRH como una herramienta de gestión.

2.6.4 Ley de Recursos Hídricos

La LRH contempla la protección, vigilancia y fiscalización del agua en su artículo 75 y 76. El primer artículo menciona que “la ANA, con opinión del consejo de cuenca, debe velar por la protección del agua, la misma que incluye la conservación y protección de sus fuentes, de los ecosistemas y de los bienes naturales asociados [...]”. El segundo indica que es “ANA quien controla, supervisa y fiscaliza el cumplimiento de las normas de la calidad ambiental del agua sobre las bases de los estándares de calidad ambiental del agua (ECA) [...]”. También menciona que “es la ANA quien debe establecer medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua, a su vez debe implementar actividades de vigilancia y monitoreo [...]” (Ley de Recursos Hídricos, 2009).

En cuanto al vertimiento de aguas residuales se menciona en el artículo 79 de la Ley que “el vertimiento de las aguas residuales en una fuente natural o marina requiere de una autorización aprobada por la ANA. Dicha autorización debe contar con una previa opinión técnica favorable de la Autoridad Ambiental y de Salud en donde figure que esas aguas deben cumplir con los Estándares de Calidad Ambiental para agua (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP)”. En el artículo 131° del reglamento de la LRH se define a las aguas residuales como “aquellas, cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo” (ANA, 2010).

2.6.5 Estándares nacionales de calidad ambiental para aguas

La Ley General del Ambiente define al ECA como “la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”. Tal concentración se puede expresar en máximos, mínimos o rangos según el parámetro. Así, los ECA son un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental. Los ECA son clasificados en cuatro categorías, las que se muestran en la tabla 3 (MINAM, 2015; Miyashiro *et al.*, 2014).

Tabla 3. Estándares nacionales de calidad ambiental para agua, de acuerdo a categorías

Categoría	Clasificación	Subclasificación		Cantidad de Parám.
Categoría 1. Poblacional y recreacional	Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección.	A1	75
		Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.	A2	63
		Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	A3	32
	Aguas superficiales destinadas para recreación	Contacto primario	B1	43
		Contacto secundario	B2	17
Categoría 2. Actividades marino costeras	Agua de mar	Extracción y cultivo de moluscos bivalvos em aguas marino costeras	C1	26
		Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en agua marino costeras	C2	27
	Agua continental	Otras actividades en aguas marino costeras	C3	20
		Extracción y cultivo De otras Especies hidrobiológicas	C4	25
Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales.	Parámetros para riego de Vegetales	Riego de cultivos de tallo alto y tallo bajo	D1	50
	Parámetros para bebidas de animales	Bebida de animales	D2	46
Categoría 4. Conservación del ambiente acuático.	Lagunas y lagos		E1	49
	Ríos	Río de la costa y la sierra	E2	47
			E2	
		Río de la selva	E3	47
	Ecosistemas marino costeros	Estuario	E4	40
Marino		E5	10	

Fuente: adaptado de Miyashiro, *et al.* 2014 – Actualizado: DS-NDEG-015-2015-MINAM.

2.6.6 Límites máximos permisibles

Los LMP, de acuerdo a la Ley General del Ambiente, son “la medida de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente” (MINAM, 2005). En la actualidad, se han establecido LMP de descarga de efluentes para tres sectores tal como se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de parámetros a evaluar de LMP por sector

Sector	Subsectores	N° de parámetros
Energía y Minas	Minería	12
	Electricidad	3
	Hidrocarburos	21
Producción	Pesquería	4
	cemento	3
	cerveza	6
	Papel	6
	Curtiembre	11
Sector Vivienda, Construcción y Saneamiento	PTAR	7

Fuente: Elaboración propia.

2.6.7 Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales

En el marco del Plan Nacional de Vigilancia de la calidad del agua y de acuerdo al artículo 126° del reglamento de la Ley de Recursos Hídricos se menciona que el monitoreo de calidad de las aguas se efectúa de acuerdo a un protocolo aprobado por la ANA. El protocolo en mención tiene como objetivo “estandarizar los criterios y procedimientos técnicos para evaluar la calidad de los recursos hídricos, continentales y marino-costeros considerando el diseño de las redes de puntos de monitoreo, la frecuencia, el programa analítico, la medición de parámetros de campo, la recolección preservación, almacenamiento, transporte de muestras de agua, el aseguramiento de la calidad, la seguridad del desarrollo del monitoreo” (ANA, 2016c). Para cumplir dicho objetivo se han establecido dos aplicaciones:

- El monitoreo de la calidad del cuerpo receptor de vertimientos autorizados
- El monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales

2.6.7.1 Monitoreo de la calidad del cuerpo receptor de vertimientos autorizados

Esta aplicación “establece los criterios que deben aplicar los titulares de las autorizaciones de vertimiento de aguas residuales a cuerpos de aguas naturales para realizar el monitoreo de calidad del agua del cuerpo receptor en base a los estándares de calidad ambiental para agua” (ANA, 2016c). Los criterios para realizar el monitoreo son se presentan en la tabla 5 a continuación.

Tabla 5. Criterios para el monitoreo de calidad de un cuerpo receptor de vertimientos autorizados

Criterios	Descripción
Ubicación de los puntos de control de calidad del cuerpo receptor de un vertimiento de aguas residuales	Ubica los puntos de control en los cuerpos receptores: loticos, lenticos y marino costeros. Indica la distancia (en metros) a la cual se ubican los puntos de control. Estos puntos estarán georreferenciados mediante GPS, las coordenadas deberán estar en UTM y bajo en el estándar geodésico WGS84.
Frecuencia de monitoreo de la calidad del cuerpo receptor de un vertimiento de aguas tratadas	La fecha y la frecuencia del monitoreo debe ser igual a la frecuencia establecida por las normas sectoriales vigentes.
Parámetros de control en función de la actividad generadora de aguas residuales	Establece los parámetros para el control de la calidad del agua en un cuerpo receptor en función de la actividad generadora (Ej. Doméstica y municipal) y de la categoría ECA-agua del cuerpo receptor (Ej. Categoría 1)
Toma, conservación, preservación y análisis de las muestras de agua	Este criterio debe ser realizado en base a la autorización de vertimiento de aguas residuales tratadas y en concordancia con el instrumento ambiental y con las disposiciones establecidas en el Protocolo. Se indica si el material del envase que va a almacenar la muestra (plástico, vidrio u otro), el tipo de parámetro que se va a medir, las condiciones de almacenamiento y preservación (pH, temperatura y otros), y el tiempo de almacenamiento (in situ, horas, días o meses)
Remisión de los reportes de monitoreo	Sistematización de los resultados del monitoreo y elaboración de los Informes, los cuales deben ser publicados en la página web de la ANA.

Fuente: adaptado del Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016c)

2.6.7.2 Monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales

Esta aplicación “establece los criterios técnicos y lineamientos generales a aplicarse en las actividades de monitoreo de la calidad de agua superficiales realizadas por la ANA y por otras entidades” (ANA, 2016c). Los criterios para realizar el monitoreo aparecen en la tabla 6.



Tabla 6. Criterios para el monitoreo de calidad de los recursos hídricos superficiales

Criterios	Descripción
Recursos humanos	Equipo de personas con conocimientos de la zona y sobre la toma y manejo de las muestras conforme a lo establecido en el protocolo.
Recursos económicos	Es el presupuesto económico que se requiere para la realización del muestreo y monitoreo, tal como lo establece el protocolo.
Tipos de muestra de agua	Las muestras pueden ser simples, compuestas o integradas. El protocolo describe cada una de ellas y su respectivo fin.
Planificación del monitoreo	La planificación consta del premonitoreo, monitoreo y postmonitoreo. El protocolo establece todas las actividades que se debe realizar en cada etapa.
Establecimiento de la red de puntos de monitoreo	El diseño y establecimiento de la red de puntos de monitoreo debe realizarse de manera preliminar en el gabinete. Para ello se debe contar con la información de la cuenca, lago, laguna o mar que se va a monitorear. El protocolo establece las consideraciones que se deben tener en cuenta al establecer los puntos de monitoreo, y establece una codificación para cada punto de monitoreo específico.
Frecuencia de monitoreo	La frecuencia de monitoreo va a estar sujeta a la estacionalidad, variabilidad de las corrientes, variabilidad de los procesos productivos e industriales, eventos extraordinarios, ocurrencia de enfermedades y/o epidemias.
Parámetros recomendados en el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales	Los parámetros mínimos recomendados de acuerdo a la categoría de los recursos hídricos y los ECA-agua.
Preparación de materiales, equipos e indumentaria de protección	Aquí se lista todos los materiales que se debe contar para realizar el monitoreo. Además, se menciona las características de los materiales y equipos necesarios. Esto involucra desde el transporte, materiales y equipos,

	soluciones y reactivos, formatos, permisos, material cartográfico, indumentaria de protección y otros.
Seguridad en el trabajo de campo	Se menciona una serie de consideraciones que se deben tomar en cuenta durante el trabajo de campo y realización del monitoreo.
Reconocimiento del entorno	Se reconoce las características del entorno como coloración anormal del agua, abundancia de algas, presencia de residuos, entre otros que ese establece en el anexo I del protocolo.
Rotulado y etiquetado	Se menciona los datos que debe contener el etiquetado (nombre del solicitante, código del punto de muestreo, entre otros), la manera como debe realizarse el etiquetado (cinta adhesiva transparente) y el momento en el que debe realizarse el etiquetado (antes de realizar la toma de muestras).
Medición de las condiciones hidrográficas en aguas continentales y marino-costeras	Esto involucra para las aguas continentales, la medición del caudal y el método que se va a utilizar para ello (correntómetro, flotador o volumétrico). Para las aguas marino-costeras, su dinamismo depende de los vientos y por la diferencia de densidades (flujo de energía). En ese sentido, el protocolo establece que se pueden utilizar datos de las investigaciones realizadas para determinar las condiciones hidrográficas marino-costeras o aplicar los métodos euleriano y lagrangiano.
Georefenciación del punto de monitoreo	El punto de monitoreo debe ser identificado utilizando la información registrada en la ficha que figura en el anexo IV del protocolo. Para ello, se debe hacer uso de un GPS.
Medición de parámetros en campo	El protocolo menciona los criterios para tomar los parámetros a medir en campo, los cuales son: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, entre otros.
Procedimiento para la toma de muestras	El protocolo establece el procedimiento para la toma de muestras en ríos o quebradas, en lagos, en el mar o a orillas de las playas, desde puentes, usando embarcación, utilizando una botella hidrográfica para diferentes profundidades y utilizando manguera para toma de muestras a diferentes profundidades.
Preservación, llenado de la cadena de custodia, almacenamiento, conservación	El protocolo establece el procedimiento para preservar, almacenar y transportar las muestras tal como lo menciona en su anexo VII. Asimismo, menciona los datos que deben llenarse en la cadena de custodia.

y transporte de muestras	
Aseguramiento de la calidad del muestreo	Los controles de calidad requeridos en el proceso de muestreo son el blanco de campo, blanco de viaje, blanco de frascos, blanco de equipos, duplicado de campo, matrices adicionadas. Para cada uno de los controles, el protocolo indica el procedimiento a seguir.
Actividades de postmuestreo	Las actividades finales del monitoreo involucran los análisis en el laboratorio, procesamiento de datos y elaboración de informes. El protocolo menciona la necesidad de que el laboratorio sea acreditado.

Fuente: adaptado del Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016c)

En el Perú, los principales factores antropogénicos que afectan la calidad del recurso hídrico son la minera informal, los pasivos ambientales, el manejo inadecuado de los residuos sólidos, los vertimientos de aguas residuales no tratadas y el manejo inadecuado de agroquímicos en la agricultura. Los principales factores naturales que influyen en la calidad del agua son las características geológicas, hidrológicas, las condiciones climáticas y los fenómenos naturales (ANA, 2016a). Por ello, la evaluación de la calidad del recurso hídrico en el país es de suma importancia para realizar una adecuada GCRH.

Entre los años 2000 y 2012 se han realizado 331 monitoreos en 59 cuencas hidrográficas en el Perú (ANA, 2016a). Estos monitoreos evaluaron la calidad del recurso hídrico, a través del análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, así como de los usos de agua de acuerdo a la clasificación del recurso. Los resultados determinaron que hay afectación de la calidad de los recursos hídricos con fines para riego y con fines de conservación del ambiente acuático en las tres vertientes, y con fines poblacionales en las vertientes del Pacífico y Amazonas. Asimismo, se determinó que estas afectaciones se deben principalmente a las descargas de aguas residuales poblacionales, pasivos ambientales, minería informal y aspectos naturales de la cuenca hidrográfica (ANA, 2016a). Desde el año 2009, la ANA ha realizado monitoreos en ríos, lagos y lagunas con el fin de evaluar su calidad y, a partir del año 2010, la autoridad priorizó la intervención de potenciales fuentes de contaminación en 37 cuencas hidrográficas. Entre los años 2013 y 2014 se han identificado 4147 fuentes de afectación en las tres vertientes hidrográficas y, hasta el año 2014, se han identificado 41 cuencas hidrográficas en las que se exceden los ECA siendo la principal causa de afectación el vertimiento de aguas residuales domésticas y municipales. En el año 2015 se ha monitoreado 84% del total de cuencas a nivel nacional y en el periodo 2011-2015 se han realizado 434 monitoreos en total (ANA, 2016a). En todas ellas, se determinó que la principal fuente de afectación son las aguas domésticas residuales.

En la Ley de Recursos Hídricos se establecen tanto el uso de instrumentos de comando-control como económicos. El uso de instrumentos económicos por parte de la ANA como las retribuciones económicas, las tarifas e incentivos se encuentran determinadas por ley. La aplicación de estos requiere de la fijación de los objetivos ambientales y del trabajo en conjunto con el mecanismo de comando y control. Este último necesita contar con la instalación de redes de monitoreo adecuadas y del monitoreo constante de los parámetros establecidos por los ECA y LMP. La información recolectada de los monitoreos establecidos debe ser procesada y presentada de manera entendible para los gestores y el público en general, de tal manera que facilite el proceso de toma de decisión, la planificación y gestión del recurso (Biswas *et al.*, 2006). El procesamiento de datos de calidad de agua se realiza principalmente a través de herramientas estadísticas. Por ello, a continuación, se hará una breve descripción de las técnicas estadísticas aplicada en esta tesis para el análisis de la red de monitoreo de la cuenca del río Jequetepeque.

3. EL ANÁLISIS MULTIVARIADO

La estadística ambiental se ha desarrollado rápidamente durante los últimos años ante la demanda de información ambiental para el desarrollo adecuado de los planes de gestión ambiental de cada país (Barnett, 2004). El monitoreo y control de la calidad del agua es un mecanismo de suma importancia en la gestión ambiental. La información que se obtiene de los monitoreos de calidad del agua requiere del procesamiento de datos a través de las herramientas estadísticas (Einax, Zwanziger y Geib, 1997).

Distintas herramientas estadísticas han sido utilizadas en el análisis ambiental (Harmancioglu *et al.*, 1999; Kostas y Dimitra, 2012; Asadollahfardi, 2015). De todas ellas, el análisis multivariado adquiere mayor relevancia en el análisis de calidad de agua. Algunas investigaciones se han centrado en evaluar las distribuciones espaciales y temporales de metales distribuidos en una cuenca (Sun *et al.*, 2007; Sundaray *et al.*, 2006; Yacoub *et al.*, 2013), otras a analizar los índices de calidad de agua superficial en una red de monitoreo (Espejo *et al.*, 2012; Shrestha y Kazama, 2007), o analizar la eficacia las redes de monitoreo y los parámetros de calidad de agua en redes establecidas en una cuenca (İşçen *et al.*, 2009; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005).

3.1 Definición

El análisis multivariado consiste en una serie de técnicas o métodos estadísticos que analizan las distintas relaciones entre variables, y que proporcionan información sobre los patrones de la estructura conjunta de los datos (Véliz, 2016). A continuación, se explica, sin profundizar en la complejidad matemática, el desarrollo del análisis multivariado, la interpretación de los resultados que se obtiene de su aplicación, y la descripción breve del pretratamiento de datos que se requiere para las técnicas multivariantes utilizadas en esta tesis: el análisis de conglomerados y el análisis factorial.

3.2 Análisis y pretratamiento de datos

El pretratamiento de datos es una parte esencial para el análisis multivariado. Se construye la matriz de datos original antes de realizar cualquier tipo de análisis. Este tratamiento, en general, involucra el análisis de los datos inconsistentes, datos faltantes y datos atípicos en la base de datos (Hair *et al.*, 2014).

En lo que se refiere a los casos faltantes, existen varios métodos de imputación de datos entre los cuales se encuentran: la imputación por la media, por un valor constante, por regresión, por redes neuronales, etc (Hair *et al.*, 2014). De todas ellas, los métodos de imputación más utilizados en datos ambientales son la imputación por un valor constante y por la media. El primero se realiza sustituyendo los datos ausentes por los valores de los límites de detección de sus respectivos

análisis, y el segundo se realiza para aquellas variables que no posean límites de detección (Ofungwu, 2014).

En el análisis multivariado es recomendable que las variables tengan una distribución normal, más no es necesario. Para ello, se realiza la transformación de los datos de las variables con la finalidad de que la distribución de los datos se asemeje a la distribución normal sin perder la información y las características inherentes de los mismos. Existen varios tipos de transformaciones para este fin, entre las comunes se encuentran: la inversa ($1/X$ o $1/Y$), la cuadrada (Y^2 o X^2), la raíz cuadrada (\sqrt{X} o \sqrt{Y}), la logarítmica ($\log Y$ o $\log X$) (transformaciones de Box-Cox) (Box y Cox, 1982; Ofungwu, 2014).

Finalmente, se debe realizar la estandarización de los datos, la cual consiste en restar el valor del dato por la media y dividirlo por la desviación estándar. La estandarización se aplica normalmente a los datos de las variables transformados, y se realiza principalmente para que la relación entre ellas no sea perjudicada por sus unidades de medida (por ejemplo, temperatura en grados Celsius, presión en masa por metros cuadrados) y para que los resultados puedan ser interpretables gráficamente (Schuenemeyer y Drew, 2011).

3.3 El análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados permite agrupar a sujetos o variables en grupos o conglomerados lo más homogéneamente posible y, a la vez, mantener la heterogeneidad entre ellos. Este análisis permite simplificar los datos en base a las características de cada conglomerado y mostrar relaciones entre las variables o sujetos que no pueden ser observadas individualmente. El proceso del análisis de clúster se resume en cinco pasos (Hair *et al.*, 2014), los cuales se muestran en la figura 7.

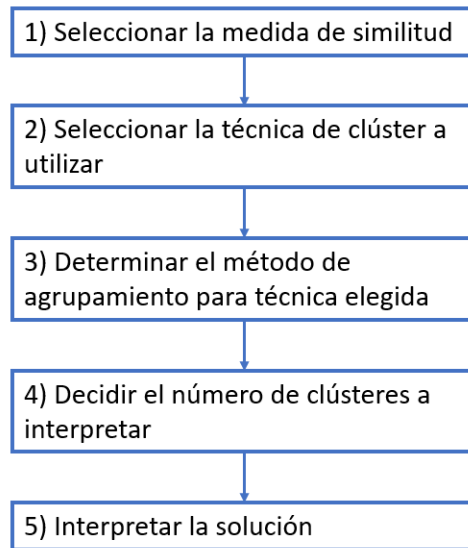


Figura 7. Proceso del análisis de conglomerados

El **paso 1** consiste en seleccionar la medida de similitud que se va a utilizar. Existen dos tipos de medidas de similitud, las medidas de asociación y las medidas de distancia. Las primeras se utilizan para escalas no métricas, y las segundas se utilizan para escalas métricas. La medida de distancia más utilizada es la euclídea para escalas métricas como las que se utilizan en esta tesis. La distancia euclídea para dos dimensiones, se define como:

$$Distancia = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Esta definición se puede extender para más dimensiones. Las variables que presenten distancias más pequeñas muestran un mayor grado de similitud y las variables con mayores distancias tienen menor similitud. La representación gráfica de esta distancia se muestra en la figura 8.

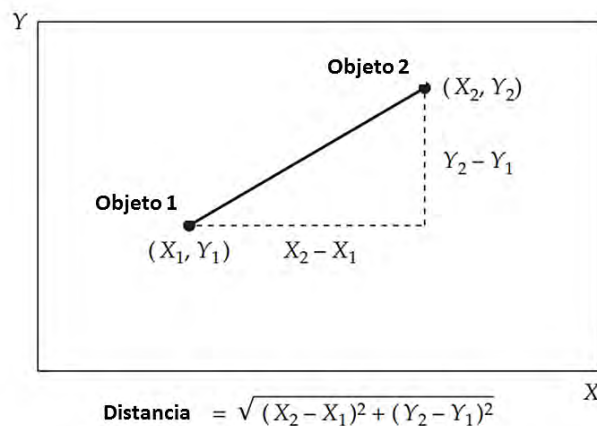


Figura 8. Distancia euclidiana entre dos objetos

Por ejemplo, en la tabla 7 se muestran las puntuaciones que se han obtenido para los sujetos A-G respecto a dos variables V1 y V2. En la tabla 8 se muestran las distancias euclidianas, y se observa que las variables E y F son las que menor distancia poseen entre sí y poseen alta similitud, mientras que las variables A y F son las que poseen menor similitud pues poseen una mayor distancia. En el análisis de conglomerados también suele utilizarse la distancia euclídea al cuadrado denominada distancia euclídea absoluta.

Tabla 7. Puntuaciones de dos variables sobre los sujetos A-G

Variable del análisis de conglomerados	Encuestados						
	A	B	C	D	E	F	G
V1	3	4	4	2	6	7	6
V2	2	5	7	7	6	7	4

Tabla 8. Distancias euclidianas entre los sujetos

Observación	Observación						
	A	B	C	D	E	F	G
A	—						
B	3,162	—					
C	5,099	2	—				
D	5,099	2,828	2	—			
E	5	2,236	2,236	4,123	—		
F	6,403	3,606	3	5	1,414	—	
G	3,606	2,236	3,606	5	2	3,162	—

Para realizar un adecuado análisis de conglomerados es recomendable estandarizar las variables. La estandarización de las variables permite que las unidades de las mismas no interfieran en el análisis pues, debido a que el análisis conglomerados busca las similitudes entre las variables u objetos, se requiere que las puntuaciones se encuentren estandarizadas.

El **paso 2** consiste en seleccionar la técnica adecuada para formar los conglomerados. Existen dos tipos de algoritmos para la obtención de los grupos y se clasifican como jerárquicos y no jerárquicos. El método de clúster jerárquico posee dos formas de obtención de los conglomerados: aglomerativos y divisivos. El primer método consiste en agrupar dos observaciones que sean las más cercanas, luego estas se combinan con otras observaciones que no están en el conglomerado, pero que se encuentran cercanas a los conglomerados ya formados y agruparlos, y así se van formando los conglomerados hasta formar un conglomerado total. El segundo método

realiza el procedimiento de agrupación en sentido contrario al método de aglomeración. Comienza con un grupo que contienen todas las observaciones, y luego se va dividiendo hasta obtener conglomerados más pequeños. En la tabla 9 se muestran los pasos del agrupamiento jerárquico a través del método de aglomeración. Este comienza por juntar las variables más cercanas hasta llegar a un solo conglomerado con todas las variables, teniendo como base la distancia entre las variables. Las primeras variables en juntarse son la E-F, luego a dicho conglomerado se añade la variable G, seguidamente se forma el conglomerado C-D, al cual se junta en un paso posterior la variable B, para finalmente obtener un conglomerado total al añadirse la variable más lejana que es la variable A. La representación del agrupamiento jerárquico generalmente se realiza a través de un dendrograma, tal como se muestra en la figura 9.

Tabla 9. Agrupamiento de clúster jerárquico

Paso	Proceso de aglomeración		Solución clúster		
	Distancia mínima entre observaciones conjunta (distancias medias no aglomeradas)	Par de observaciones	Pertenencia al conglomerado	Número de conglomerados	Medida de similitud número de conglomerados (dentro del conglomerado)
	Solución inicial		(A) (B) (C) (D) (E) (F) (G)	7	0
1	1,414	E-F	(A) (B) (C) (D) (E-F) (G)	6	1,414
2	2	E-G	(A) (B) (C) (D) (E-F-G)	5	2,192
3	2	C-D	(A) (B) (C-D) (E-F-G)	4	2,144
4	2	B-C	(A) (B-C-D) (E-F-G)	3	2,234
5	2,236	B-E	(A) (B-C-D-E-F-G)	2	2,896
6	3,162	A-B	(A-B-C-D-E-F-G)	1	3,42

Fuente: adaptada de Hair *et al.* 2014

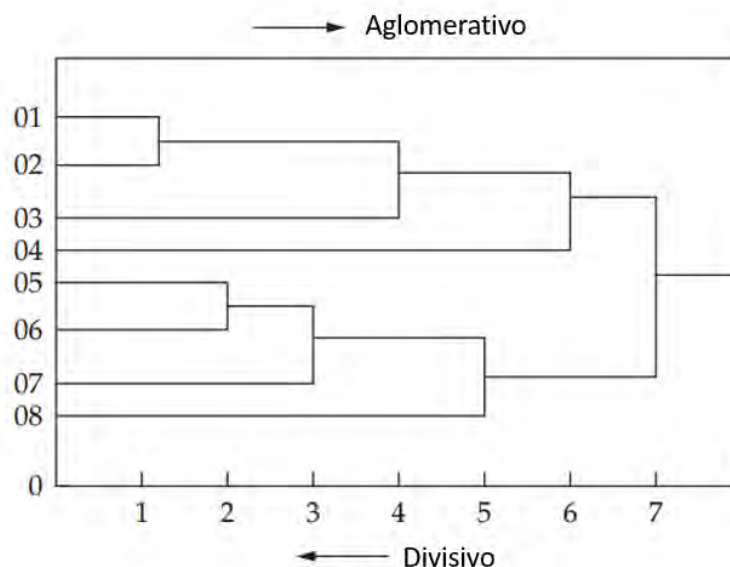


Figura 9. Representación de un dendrograma (adaptada de Hair *et al.*, 2014)

El **paso 3** consiste en determinar el método de agrupamiento para la técnica elegida. Existen varios métodos de obtención de conglomerados jerárquicos realizados a través del método de aglomeración. Entre ellos se encuentran: 1) el método de encadenamiento simple, 2) el método de encadenamiento completo, 3) el método de encadenamiento promedio, 4) el método de Ward, y 5) el método del centroide.

El método de encadenamiento simple, también conocido como “el vecino más cercano”, agrupa a los objetos en base a la distancia mínima entre ambos. Así, va agrupando objetos o conglomerados que estén más cerca hasta formar un solo conglomerado. El método de encadenamiento completo, o también conocido como “el vecino más lejano”, utiliza la máxima distancia para formar los conglomerados. El método de encadenamiento medio se basa en la aglomeración a través de las distancias medias de los primeros conglomerados. El método de Ward utiliza la suma de cuadrados de la distancia entre todas las variables de cada conglomerado para luego agrupar los conglomerados. El método del centroide utiliza la distancia euclídea.

El **paso 4** consiste en determinar el número de conglomerados final. No existe un procedimiento estándar para este propósito. Sin embargo, una manera de determinar el número de conglomerados de manera sencilla se realiza a través de las medidas de similitud. Cuando la medida de similitud guarda una discordancia o un salto súbito en relación a los demás grupos, entonces se selecciona el cluster y se va agrupando hasta obtener el número de conglomerados total.

El **paso 5**, la interpretación de los conglomerados, se realiza en términos de los valores teóricos, lo que significa que deben analizarse las variables o sujetos que conforman los conglomerados. La interpretación debe realizarse conjuntamente con los datos de las distancias que se han obtenido para la formación de los conglomerados. Cada conglomerado debe relacionarse con el fundamento teórico de acuerdo a los objetivos de investigación.

Por otra parte, la validación óptima del análisis de conglomerados es realizar un nuevo análisis con nuevas muestras. Sin embargo, al ser esta ruta poco viable en la mayoría de las veces se suele dividir las muestras en dos y realizar el análisis de conglomerados por separado y comparar los resultados. La comparación debe realizarse para cada resultado de cada conglomerado.

3.4 Análisis factorial

El análisis factorial es un método estadístico multivariante que tiene como objetivo reducir un conjunto de variables observadas o sujetos a un conjunto de variables en menor dimensión encontrando una estructura subyacente (Hair *et al.*, 2014). Las variables superficiales u observadas son las variables que el investigador va a medir en los sujetos, tal como se muestra en la figura 10. Estas variables superficiales son una expresión de las variables latentes (no observables). Por ejemplo, si se tiene como variable superficial “el número de problemas matemáticos resueltos por una persona”, esta resulta ser una expresión de una serie de variables latentes, como la habilidad numérica que posee la persona o el razonamiento espacial, entre otros. A cada una de estas variables latentes también se las denomina factores. Existen dos tipos de factores, los factores comunes y los factores únicos. Los factores comunes son aquellos que influyen en más de una variable superficial y son responsables de la correlación entre las variables superficiales; y los factores únicos agrupan a los factores específicos, aquellos que influyen en una sola variable superficial, y a los factores correspondientes a los errores de medida, tal como se muestra en la figura 11 (Catena *et al.*, 2003). Ambos tipos de factores (comunes y únicos) en conjunto son responsables de la variabilidad de las variables superficiales o también denominada varianza. Por lo tanto, se puede decir que los factores explican las correlaciones y la variabilidad (varianza) que existe entre las variables superficiales.

	Variable 1	Variable 2	Variable 3
Sujeto 1	Valor medido	Valor medido	Valor medido
Sujeto 2	Valor medido	Valor medido	Valor medido
Sujeto 3	Valor medido	Valor medido	Valor medido
Sujeto 4	Valor medido	Valor medido	Valor medido

Figura 10. Variables superficiales medidas en los sujetos

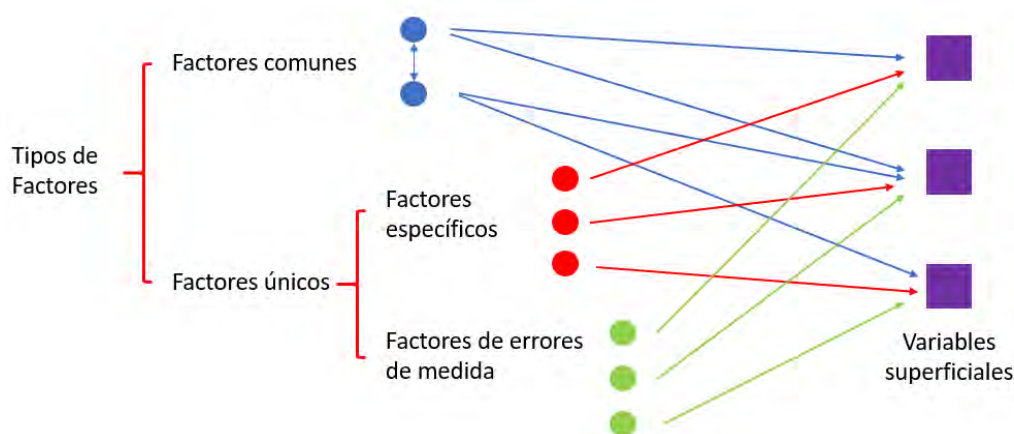


Figura 11. Tipos de factores y su influencia en las variables superficiales (adaptado de Martínez *et al.*, 2003)

Estos factores explican a las variables superficiales de diversas formas (Catena *et al.*, 2003):

- un factor puede influir en una o más variables superficiales. Por ejemplo, la habilidad numérica puede explicar el rendimiento en pruebas de matemáticas y física.
- distintos factores influyen en variables superficiales diferentes. Por ejemplo, la habilidad verbal puede explicar la fluidez verbal, pero no la velocidad de procesamiento en el espacio.
- la variabilidad de una variable superficial en un conjunto de sujetos depende parcialmente en las diferencias que existan del factor entre cada sujeto. Por ejemplo, la habilidad en la resolución de problemas matemáticos de cada sujeto va a depender, en parte, de la habilidad numérica de cada sujeto, la cual no es la misma para todos.
- existe una alta correlación entre dos variables superficiales si ambas están influidas por un mismo factor. Por ejemplo, una alta correlación entre la resolución de problemas de suma y de multiplicación en un sujeto, obedece a que ambos dependen de la habilidad numérica.

El valor medido de una variable superficial (puntuación) respecto a un sujeto depende de la influencia de ambos tipos de factores (comunes y únicos). De ahí que parte de la variabilidad (varianza) de una variable superficial se debe a los factores comunes, a la cual se le denomina varianza común o comunalidad, y otra parte de la varianza de la variable superficial se debe al factor único, conocida como varianza única, como se muestra en la figura 12.

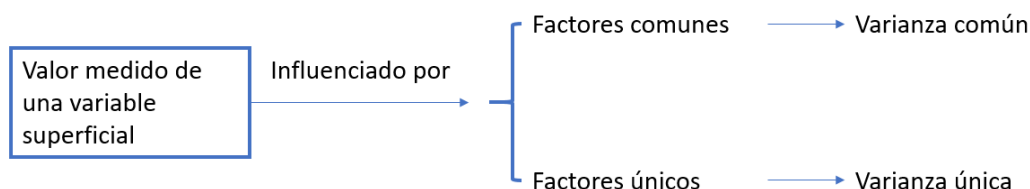


Figura 12. Influencia de los factores en el valor medido de una variable superficial

La puntuación de una variable superficial se expresa de la siguiente manera:

$$X_{ij} = F_{1i}a_{1j} + F_{2i}a_{2j} + F_{3i}a_{3j} \dots F_{pi}a_{ip} + U_i$$

donde, X_{ij} es la puntuación del sujeto ubicado en la fila i en la variable j . Debido a que solo se trata de una variable, el $j = 1$. F es la carga factorial de cada p factor común que pueden existir en una variable, a es la puntuación del sujeto en cada factor, y U es el factor único.

El análisis factorial involucra los pasos que muestran en la figura 13. El **paso 1** consiste en determinar la matriz cuyas entradas corresponden a las correlaciones entre las variables.

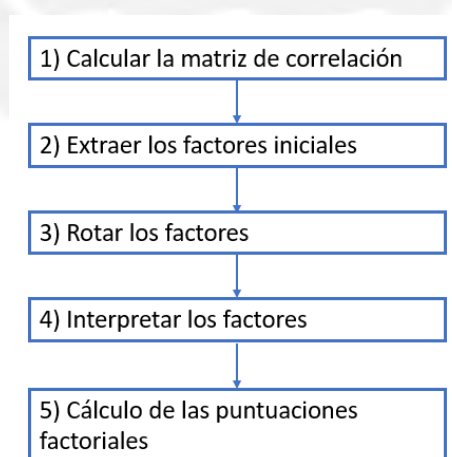


Figura 13. Pasos para el análisis factorial

Para determinar la adecuación del análisis a los datos que se tienen, existen diversos tests para este propósito entre los cuales se encuentran: el test de esfericidad de Bartlett, de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), y la correlación anti-imagen. En esta tesis se utilizó el test KMO, la que a su vez se obtiene automáticamente al realizar el proceso del análisis factorial. Este test involucra la división entre la suma de los cuadrados de las correlaciones y la suma de las sumas de cuadrados de las correlaciones y de las correlaciones parciales. Como resultado del test se obtienen valores entre 0 y 1. Para realizar los análisis multivariados es recomendable que el valor sea mayor a 0,50 (Catena *et al.*, 2003).

El **paso 2** consiste en extraer los factores. Este proceso trata de reducir la información contenida en las variables superficiales a un grupo de variables llamadas factores. Existen varios métodos de extracción de factores, entre los más comunes se encuentran: el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis factorial común (AFC). El AFC se diferencia del ACP en que el primero considera únicamente a la varianza común y el segundo considera a la varianza total. El AFC asume que los factores tienen contenido teórico; mientras que el segundo solo agrupa a las variables que correlacionan entre sí y las separa de las que no correlacionan, lo que significa que los factores, para el ACP, son solo agrupaciones de variables. Por lo tanto, el empleo del ACP permite determinar las variables que correlacionan entre sí en los factores que maximizan la varianza total, mientras que el AFC determina las variables que correlacionan entre sí en los factores que maximizan la varianza común o comunalidad. De ambos métodos, el más utilizado y el que se encuentra en los programas estadísticos es el método de componentes principales (Catena *et al.*, 2003; Hair *et al.*, 2014).

La selección del método de análisis de componentes principales es más adecuada cuando se busca la reducción de datos o encontrar el número de factores mínimos que expresan el mayor grado de variabilidad (varianza). La selección del análisis factorial común se debe realizar cuando se desea eliminar la varianza única o cuando se quieren conocer esas variables latentes en particular. Sin embargo, adolece de la indeterminación de factores, lo que significa que para cada sujeto se pueden obtener varios factores individuales, y en el cálculo de las comunalidades pueden resultar valores que indiquen que se deben eliminar las variables. A pesar de ello, se ha demostrado que ambos métodos muestran resultados similares (Catena *et al.*, 2003; Hair *et al.*, 2014).

Existe una serie de criterios para calcular el número de factores a extraer. Se debe tener en cuenta que el método empleado para obtener los factores totales calcula aquellas combinaciones que explican la mayor cantidad de varianza para el primer factor, luego el siguiente factor es calculado con el objetivo que explique la mayor cantidad de varianza del total de la varianza restante de la primera extracción, y así sigue sucesivamente hasta extraer todos los factores y que se explique la varianza total. Luego de obtener los factores, se escoge el número de factores que explique la

mayor varianza necesaria. Normalmente se seleccionan los factores que expliquen un porcentaje mayor a 60% de la varianza, aunque la selección depende del criterio del investigador (Hair *et al.*, 2014). Entre los principales criterios para la extracción de factores se encuentran: el criterio de la raíz latente, a priori, de porcentaje de la varianza y de contraste de caída. En esta tesis se aplicaron el criterio de la raíz latente y el de porcentaje de la varianza. El primero se basa en que “cualquier factor individual debería justificar la varianza de por lo menos una única variable” (Hair *et al.*, 2014). Por lo tanto, solo se consideran los factores que tengan raíces latentes mayores a 1, pues eso significa que explican, al menos, una variable. El segundo se basa en la extracción de factores que acumulan un porcentaje de la varianza total. En ese sentido se estima, pues no hay una cantidad establecida, que la cantidad seleccionada de factores deben explicar, por lo menos, 60% de la varianza total. Estos criterios pueden analizarse conjuntamente para tomar una decisión de los factores a extraer (Hair *et al.*, 2014).

El **paso 3** consiste en la rotación de factores. Una vez extraído los factores, estos se pueden rotar para interpretar mejor la solución factorial. La rotación de factores se aplica a los ejes donde se ubican los factores, de manera que estos alcancen una posición en donde la distribución de varianza sea mayor. Existen dos tipos de rotaciones: la rotación ortogonal y la oblicua. En las figuras 14 y 15 se muestran en qué consisten ambas rotaciones de manera gráfica.

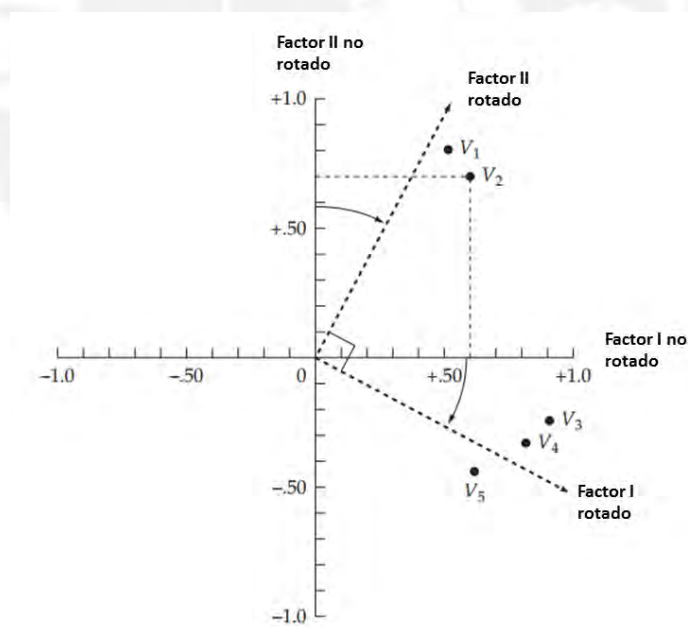


Figura 14. Rotación ortogonal (adaptado de Hair *et al.*, 2014)

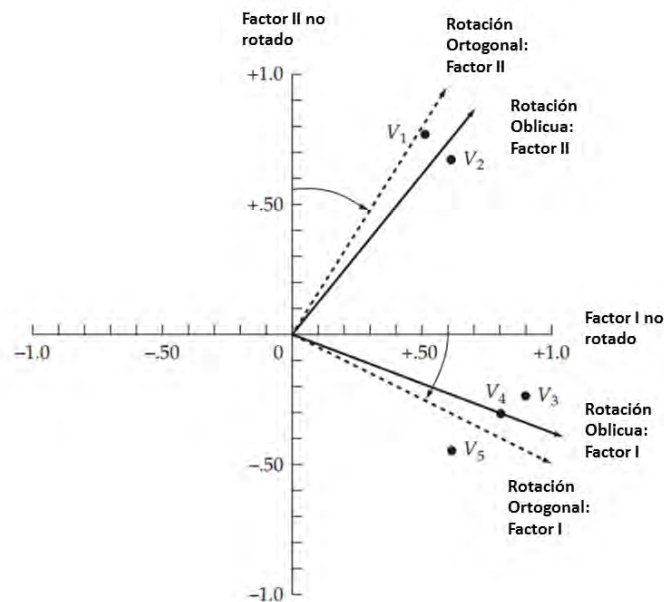


Figura 15. Rotación oblicua (adaptado de Hair *et al.*, 2014)

Como se puede observar en las figuras anteriores, la diferencia entre ambos tipos de rotación es que la rotación ortogonal gira exactamente 90° mientras que la rotación oblicua no. Los beneficios que se obtienen de cualquiera de las rotaciones es que ambas maximizan las cargas factoriales en las variables. En la figura 14 se muestran cinco variables en donde las cargas de cada variable son las perpendiculares a cada eje. Cuando los factores no se han rotado, las cargas de las variables V1 y V2 poseen unas cargas cercanas al factor II entre 0,70-0,80 aproximadamente, y al factor I cargan entre 0,50-0,60. A pesar de que ambas variables cargan más en el factor II que en el factor I, no se puede afirmar que exista una mayor significación de las variables para el factor II que para el factor I pues la diferencia entre ambas es muy baja. Sin embargo, al rotar los factores se observa que las cargas sobre el factor II de ambas variables se encuentran cercanas a 0,90, y las cargas sobre el factor I se encuentran cercanas a 0,10. De esa manera la rotación permite identificar de mejor manera las variables que cargan sobre un factor en particular. En la tabla 10 se muestra el efecto de la rotación para todas las variables.

Tabla 10. Comparación entre las cargas de los factores rotados y no rotados

Variables	Carga factorial no rotada		Carga factorial rotada	
	I	II	I	II
V1	0,5	0,8	0,03	0,94
V2	0,6	0,7	0,16	0,9

V3	0,9	-0,25	0,95	0,24
V4	0,8	-0,3	0,84	0,15
V5	0,6	-0,5	0,76	-0,13

Fuente: adaptada de Hair *et al.* 2014.

Del análisis de la carga de los factores rotados, se puede observar que existen claramente dos grupos de variables, las variables V1 y V2 y las variables V3, V4 y V5, pues ambos grupos cargan alto para un solo factor en particular. De esa manera, el agrupamiento de variables es más sencillo con los ejes rotados que con los ejes no rotados, pues las cargas factoriales para cada variable se encuentran mejor diferenciadas.

El mismo análisis se sigue para la rotación oblicua. Existen varios métodos de rotación ortogonal: Varimax, Cuartimax y Ecuamax. En esta tesis se utiliza la rotación Varimax. Ese método realiza la rotación de los factores de manera que se obtienen cargas factoriales entre -1 y +1, facilitando la interpretación de los factores. Las cargas que se encuentre cercanas a -1 o +1 muestran una clara asociación entre las variables y el factor, y las cargas cercanas a cero no presentan asociación al factor.

El **paso 4** consiste en interpretar los factores. La interpretación de los factores se puede realizar una vez calculada la matriz de factores iniciales sin rotar. Con ello se establece una idea inicial de la representatividad de las variables en los factores, pues esta matriz contiene las cargas factoriales de cada variable en cada uno de los factores. Las cargas factoriales que aparecen en la matriz de factores permite interpretar la función que la variable desempeña en el factor. Las cargas factoriales deben entenderse como las correlaciones entre la variable-factor; si una variable tiene mayor carga, es más representativa del factor. De la misma forma se realiza la interpretación de los factores rotados. Una vez seleccionadas las variables que poseen cargas significativas sobre algún factor, el investigador atribuye una etiqueta al patrón de cargas factoriales, de acuerdo a los objetivos de investigación.

El **paso 5** consiste en calcular las puntuaciones factoriales. Este proceso tiene como finalidad conocer las puntuaciones de los sujetos en cada factor. Para comprender esto, antes se debe tener en cuenta que las cargas factoriales de los factores obtenidos en los pasos anteriores están relacionadas a las variables, tal como se muestra en la tabla 10. Sin embargo, estas variables han sido medidas en los sujetos (ver la figura 10). Por tal motivo, conocer las puntuaciones factoriales de cada sujeto en cada factor indica el grado en que el sujeto está determinado por el factor. De esa manera, se vinculan las variables más significativas para cada factor al grupo de sujetos. El cálculo de las puntuaciones factoriales para cada sujeto se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = B_{ij}Z_1 + B_{i2}Z_2 + \dots B_{ip}Z_p$$

donde, F es la puntuación factorial, B depende de los pesos factoriales de cada variable en cada factor y Z son los valores medidos del sujeto en cada variable superficial.

Finalmente, la validación del análisis factorial se puede realizar dividiendo la muestra y replicando el análisis con el fin de obtener resultados similares al comparar con la matriz inicial de factores obtenidas en los resultados. Otra manera de validar los resultados es realizando un modelo de ecuaciones estructurales en el análisis factorial confirmatorio, sin embargo, puede que no todos los softwares contengan esta manera de validación.



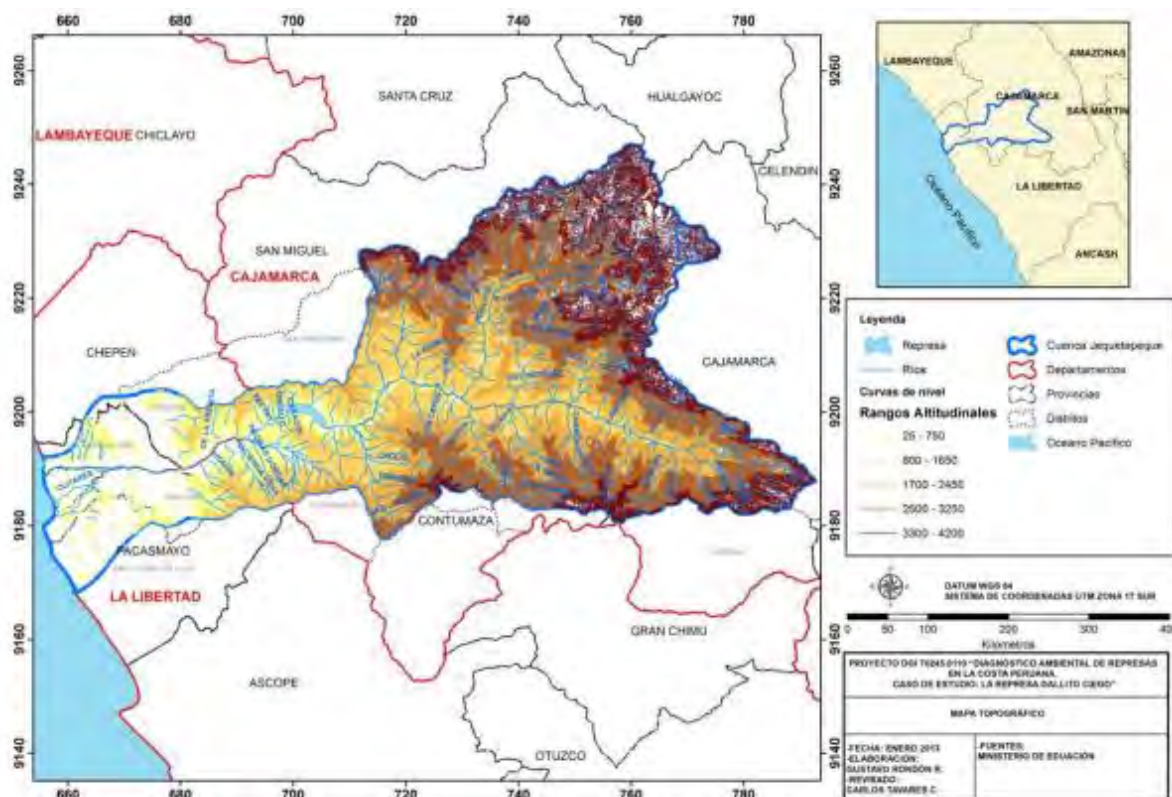
4. CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE

La cuenca del río Jequetepeque se encuentra en la vertiente occidental de los Andes en el norte del Perú entre los paralelos 7°6' y 7°30' de latitud sur y los meridianos 78°30' y 79°40' de longitud oeste, y comprende un área aproximada de 4378 km², figura 16 (Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015). La cuenca se encuentra distribuida entre las regiones de La Libertad (provincias de Pacasmayo y Chepen), Cajamarca (provincias de Cajamarca, Contumazá, San Pablo y San Miguel) y Lambayeque (distritos de las Lagunas, Zaña y Nueva Arica). Además, se considera como la cuenca alta del río Jequetepeque al territorio que va aguas arriba de la represa Gallito Ciego hasta una altitud de 4000 m s. n. m. aproximadamente (INRENA, 2004).

Las características fisiográficas de la cuenca permiten diferenciar tres zonas: el bajo Jequetepeque (0-225 m s. n. m.), el medio Jequetepeque (225-600 m s. n. m.), y el alto Jequetepeque (600-4183 m s. n. m.); en las tres, el uso agrario del agua varía desde bajo riego, bajo riego moderado, uso intenso en secano (Chunga, 2006; Girón, 2003). También se pueden diferenciar las zonas agroecológicas andinas, entre ellas: jalca (por encima de 3500 m s. n. m.), queshua o quichua (entre 2300- 3500 m s. n. m.), yunga (entre 500-2300 m s. n. m.) y chala (de 500 m s. n. m. hacia al litoral) (Chunga, 2006).

El río Jequetepeque nace en los cerros Agopití, Puente y Cercopampa en la provincia de Cajamarca, desemboca en el Pacífico fluyendo en dirección oriente-occidente; tiene una longitud de 161,5 km, pendiente media de 2,6% y promedio anual de descarga es de 816,49 MMC (Chunga, 2006; Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015). Sus niveles altitudinales se encuentran entre 0 y 4188 m s. n. m. Los caudales del río pueden llegar a ser menores de 0,168 m³/s en periodos de estiaje, mientras que a 230,23 m³/s en periodos de avenida, lo cual refleja su marcada estacionalidad (Girón, 2003; Peña *et al.*, 2015).

Con el fin de mejorar el aprovechamiento de las aguas del río se construyó, en los años 80, la represa Gallito Ciego en el marco del proyecto especial Jequetepeque-Zaña. La represa se encuentra ubicada en la ciudad de Tembladera, distrito de Yonán, provincia de Contumaza, región de Cajamarca, a 404 m s. n. m. Posee una superficie de 14 km², una capacidad útil de 400,4 MMC, un volumen para sedimentos de 85 MMC y se encuentra a 49 km de la desembocadura (Peña *et al.*, 2015; Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015). Cumple un rol importante pues permite el desarrollo de la actividad agrícola y ganadera de forma intensiva en el valle del Jequetepeque, y provee de agua a las ciudades que se encuentran ubicadas en la costa (Girón, 2003).



4.1 Aspectos meteorológicos y vegetación.

Las características climatológicas de la cuenca del Jequetepeque son influenciadas por la altitud de la cordillera de los Andes, el fenómeno del Niño y la corriente del Humboldt. La diversidad climática en la cuenca va desde climas desiertos, secos, calurosos con precipitaciones escasas o esporádicas en la parte baja de la cuenca a climas húmedos y fríos o boreales con precipitaciones medias y altas en las partes altas (Peña *et al.*, 2015).

La precipitación anual en la cuenca va desde 15mm/año (desierto costero) a 1100 mm/año (páramo pluvial andino) en años normales (Girón, 2003) y en años que presentan el fenómeno del Niño, la precipitación puede llegar entre 220 a 3000 mm/año (Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015). La temperatura varía entre 30°C en la costa hasta 2°C en los Andes. La evaporación varía entre los 800 mm en el valle y 1200-1500 mm en la zona andina. La humedad relativa varía entre 80-90% en el valle y 60% en la zona andina (Peña *et al.*, 2015). Por otra parte, la vegetación en la cuenca del Jequetepeque es muy diversa. En la tabla 11 se muestran las unidades bioclimáticas (Peña *et al.*, 2015).

Tabla 11. Unidades bioclimáticas de la cuenca del Jequetepeque

Unidades bioclimáticas, m s. n. m.	Descripción
0-1000	La vegetación está ligada a la producción agrícola con riego. Las especies que predominan son el algarrobo, sapote, faique, cactus gigante, palo santo, entre otras. Además, se encuentran cultivos de arroz, papa, caña de azúcar, maíz, alfalfa, entre otros.
1000-1900	La vegetación consiste de bosques mayormente de protección como: hualtaco palo santo, faique, molle, tara, entre otros. También se encuentran cultivos de subsistencia como por ejemplo: maíz, yuca, frijol, etc.
1900- 2800	En esta zona la vegetación consiste de alisos, tara, molle, sauco, pauca, lloque, entre otros.
2900-3500	En esta zona la vegetación natural ha sido deforestada. Aun así, se pueden encontrar cucharilla, chachacomo, suro, tarhui, zarzamora, entre otros. En esta zona generalmente se realiza la actividad agrícola de secano. Los cultivos principales son la papa, olluco y oca. Asimismo, existen zonas reforestadas con pinos aledañas a la Granja Porcón.
Mayor a 3500	La vegetación consiste principalmente de cubierta vegetal del tipo graminal. Entre las especies más representativas se encuentran: <i>Senecio</i> sp., <i>Speletia</i> sp., <i>Hypericum laricifolium</i> , <i>Brachyotum</i> sp., entre otros.

4.2 Aspecto demográfico

Según las proyecciones realizadas por el INEI al año 2015, la población en la cuenca del río Jequetepeque asciende a 310 707 habitantes, 61,47% de los cuales viven en la cuenca baja, mientras 38,53% vive en las partes media y alta de la cuenca (INEI, 2015). La mayor concentración de la población urbana se centra en la costa, precisamente en las ciudades de Chepén, Pacasmayo y Guadalupe, mientras que en la zona alta predomina la población rural.

4.3 Aspectos geológico y geomorfológico

La geomorfología de la cuenca del Jequetepeque es variada y está compuesta por las siguientes unidades geomorfológicas: planicie costera, lomadas y colinas, montañas y las altiplanicies. Estas pueden ser agrupadas en tres geomorfoestructuras: región marina litoral, repisa continental, y cordillera andina. Las unidades geomorfológicas consideran los accidentes tectónicos y las diferentes formas del relieve que se presentan en la cuenca (Peña *et al.*, 2015). En la tabla 12 se describen las características de cada una de estas unidades geomorfológicas y en la figura 17 se muestra el mapa geomorfológico de la cuenca.

Tabla 12. Aspectos geomorfológicos

Unidades geomorfológicas	Características
Planicie costera	Constituida por materiales heterogéneos de origen fluvial, aluvial, marino y eólico. Sus propiedades presentan alto grado de porosidad intergranular. En este sector se encuentran las zonas cercanas a Pacasmayo, Chepén, San Pedro de Lloc, etc.
Lomadas y colinas	Constituidas por rocas facturadas totalmente, con fallas que evidencian eventos tectónicos antiguos. Asimismo, se evidencia erosión y meteorización en la parte media y baja de la cuenca del Jequetepeque. Las lomadas se ubican alrededor de la desembocadura del río Jequetepeque y están constituidas principalmente por rocas intrusivas y volcánicas. Mientras que las colinas están compuestas por areniscas, conglomerados y lutitas.
Montañas de moderada pendiente	Están constituidas principalmente por rocas volcánicas y volcánicas sedimentarias. Presentan montañas que tienen desniveles de 400-900 metros de altura. Las rocas volcánicas y sedimentarias se encuentran principalmente en la parte media y alta de la cuenca
Montañas de alta pendiente	Se encuentran principalmente en las partes más altas de la cuenca alrededor de los 3000 a 3500 m s. n. m. Constituidos por rocas sedimentarias y volcánicas. Estas se pueden evidenciar en Chilite, Magdalena y Contumazá.
Altiplanicies	Se encuentran por encima de los 3500 m s. n. m. y se caracterizan por presentar relieves ligeramente ondulados a escarpado, las cuales se encuentran principalmente al noreste de la cuenca.



Figura 17. Mapa geomorfológico de la cuenca Jequetepeque (Elaboración propia en ArcGis 10.2. Fuente: Sinia)

Las unidades geológicas de la cuenca del Jequetepeque tienen origen tectónico y presentan una variedad de rocas sedimentarias, metamórficas, volcánicas e intrusivas de edades que van desde el Paleozoico inferior hasta el Cenozoico, tal como se muestra en la figura 18 (Chira *et al.*, 2007; Peña *et al.*, 2015).

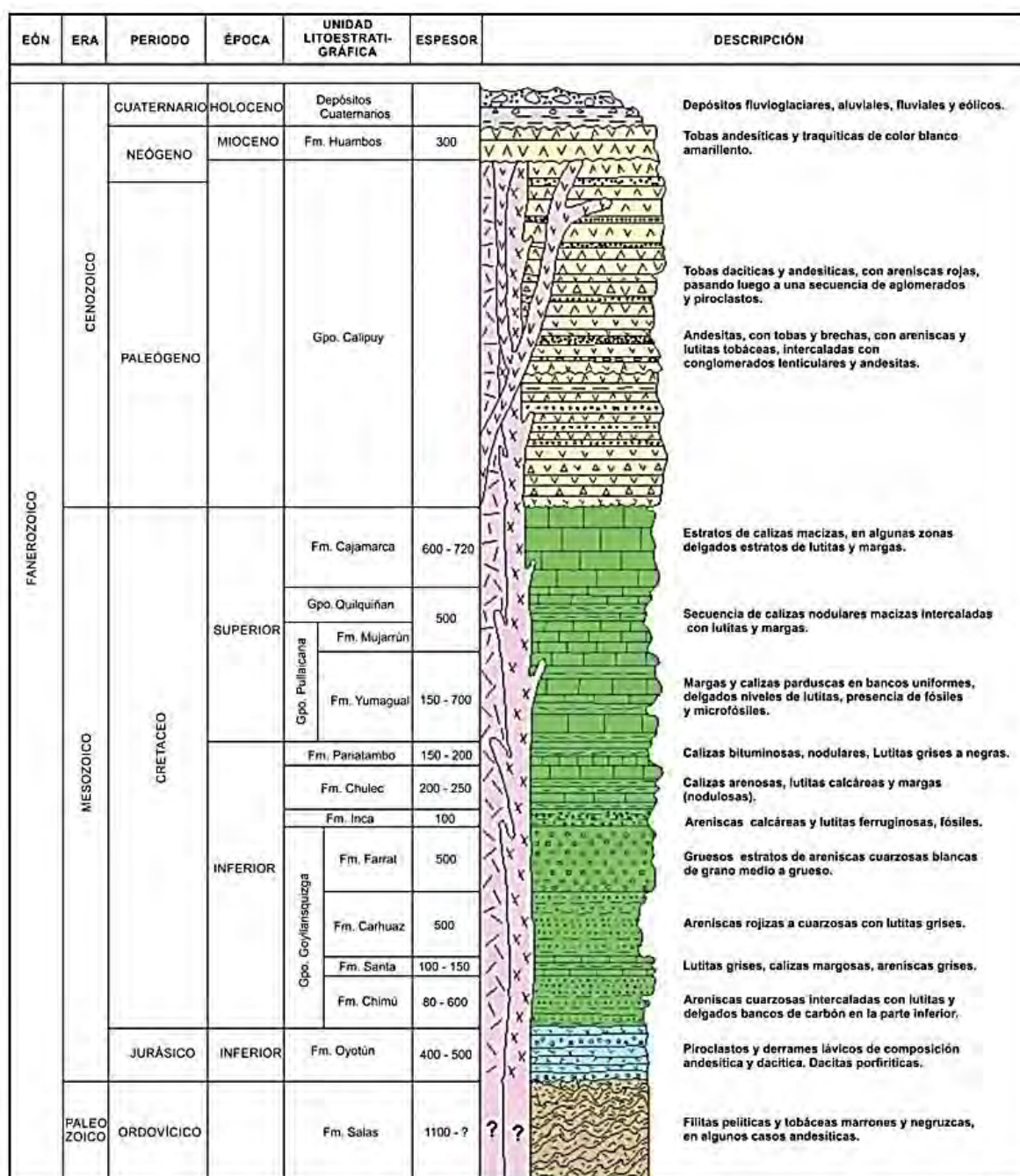


Figura 18. Características estratigráficas para la cuenca del Jequetepeque (Fuente: Peña *et al.*, 2015)

Las principales formaciones geológicas en la cuenca se muestran en la tabla 13, y el mapa geológico de la cuenca se muestra en la figura 19.

Tabla 13. Aspectos geológicos en la cuenca del Jequetepeque

Formaciones geológicas	Descripción
Depósitos Recientes (Qr-al/e)	Están constituidas por formaciones sedimentarias edáficas y aluviales, las cuales forman parte de las zonas agrícolas. Estas principalmente se encuentran en la desembocadura del río.
Grupo Calipuy (Ti-vca)	Constituida principalmente por secuencias de volcánicos sedimentarios. Estas se pueden encontrar en las zonas de Chilete, tembladera y San Pablo. En ciertas zonas de tembladera se encuentran tufos riolíticos plegados de rocas andesíticas.
Formación Chicama (Js-Chic)	<p>Estas formaciones litológicas se encuentran principalmente en las partes altas de la cuenca del Jequetepeque. En la mayoría de afloramientos de estas formaciones se observan lutitas negras laminares con delgadas intercalaciones de areniscas grises. Además, se pueden evidenciar en algunos lugares andesíticos de color gris verdoso y venillas de yeso en los estratos de la formación. En ocasiones las lutitas oscuras poseen areniscas ricas en alúmina.</p> <p>Este tipo de rocas son blandas generalmente debido a la cantidad de limo arcilloso. De acuerdo a la litología y al alto contenido de piritita en los sedimentos de esta formación señalan que el material se deposita en un ambiente anaeróbica.</p>
Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)	Consiste litológicamente de cuarcitas blancas masivas y areniscas, con interrelaciones delgado de lutitas marrones y grises. Normalmente se encuentran en los Andes Centrales.
Formación Chimu (Ji-Chic)	Esta formación cubre grandes áreas de la cuenca, forma farallones al margen del río. Litológicamente se encuentra constituida por lutitas, areniscas y cuarcitas. En niveles inferiores presenta bancos de carbón antracítico.
Formación Yumagual (Ks-Yu)	Están constituidas principalmente por horizontes de calizas y margas en bancos con niveles fosilíferos.
Formación Cajabamba (Ks-Ca)	Cubren principalmente los flancos de las quebradas, poseen espesores de 800-700 metros y son principalmente secuencias calcáreas.

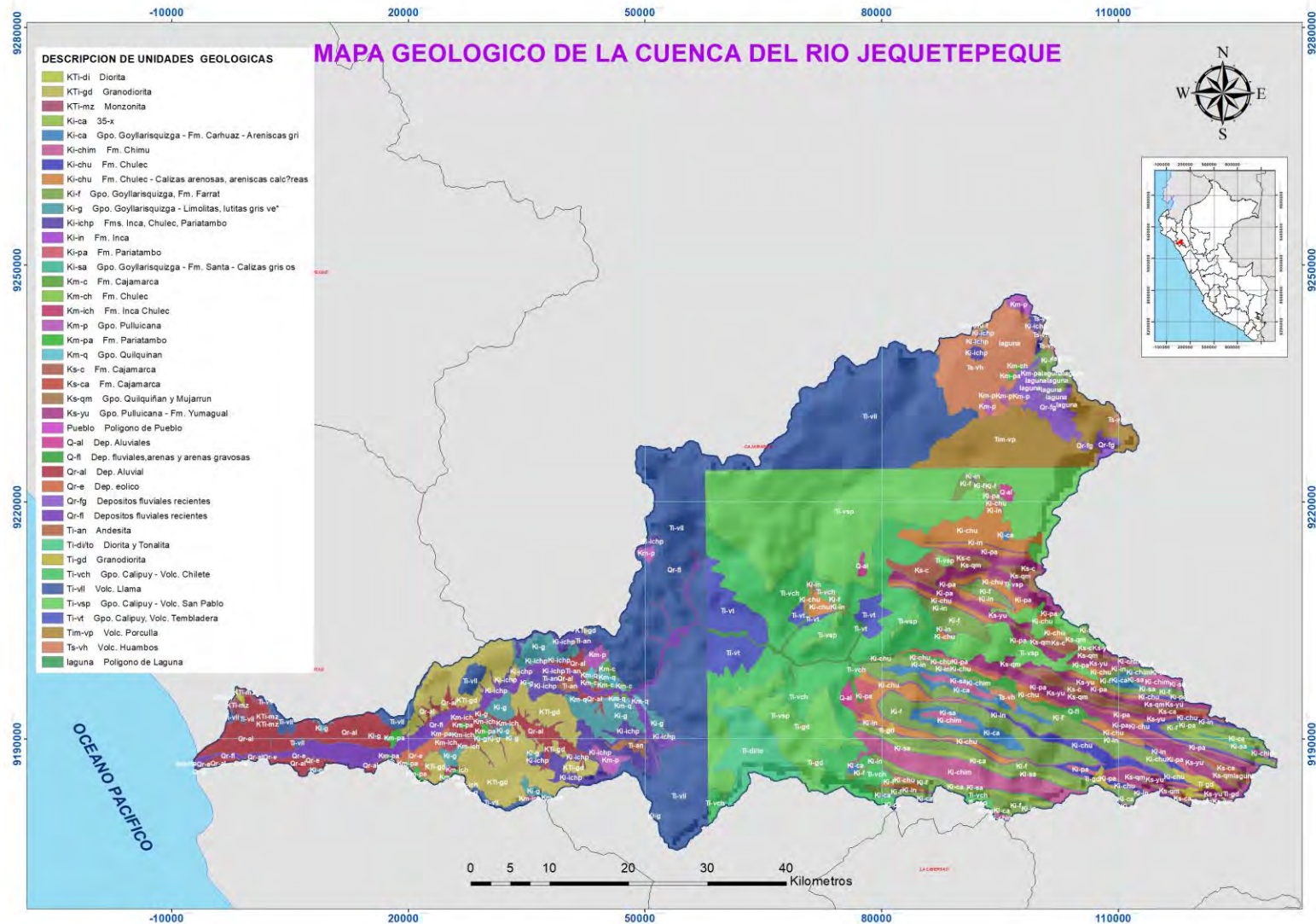


Figura 19. Mapa geológico de la cuenca del Jequetepeque (Elaboración propia en ArcGis 10.2. Fuente: Sinia)

La exploración geológica ha permitido el descubrimiento de importantes yacimientos de mineralización de oro, oro-plata y cobre; entre los más conocidos son los yacimientos de alta sulfuración de Yanacocha y Sipán. Ambos se encuentran en los corredores estructurales de Chicama-Yanacocha y San Pablo-Porculla, los cuales controlan una serie de fenómenos estructurales, magmáticos e hidrotermales, en los que muchos yacimientos metálicos se encuentran alineados. Adicionalmente, existen sistemas sulfato-ácidos con mineralización de oro y plata y otros que presentan metales de zinc, plomo y plata (Chira *et al.*, 2007; Peña *et al.*, 2015).

Los yacimientos de Yanacocha y Sipán se encuentran influenciados por la franja de oro-cobre del norte del Perú, la cual se muestra en la figura 20. Esta franja de 40 a 75 km de ancho recorre desde la parte media de Ancash y hasta la parte media de Ecuador atravesando la cuenca del Jequetepeque por medio de las regiones de Cajamarca y La Libertad. Esta franja alberga los yacimientos de oro, cobre-oro, y en menor proporción plata-oro-cobre-zinc-plomo (Chira *et al.*, 2007).

La minera Yanacocha es una empresa conjunta en la que forma parte Newmont Mining Company, Compañía Minera Buenaventura S.A y la Internacional Finance Corporation. Esta empresa está ubicada al noreste de la ciudad de Cajamarca y tiene como principal producto el oro. La geología del depósito de Yanacocha está conformada por una serie de yacimientos auríferos que poseen oro diseminado de alta sulfuración, del tipo ácido-sulfato. La mina Sipán ubicada al noreste de la cuenca del Jequetepeque presenta yacimientos de oro diseminado, cobre y yacimientos polimetálicos. La geología de la zona presenta rocas sedimentarias cretácicas y rocas volcánicas terciarias, las cuales se encuentran afectadas por diferentes grados de mineralización y alteración (Chira *et al.*, 2007; Peña *et al.*, 2015).

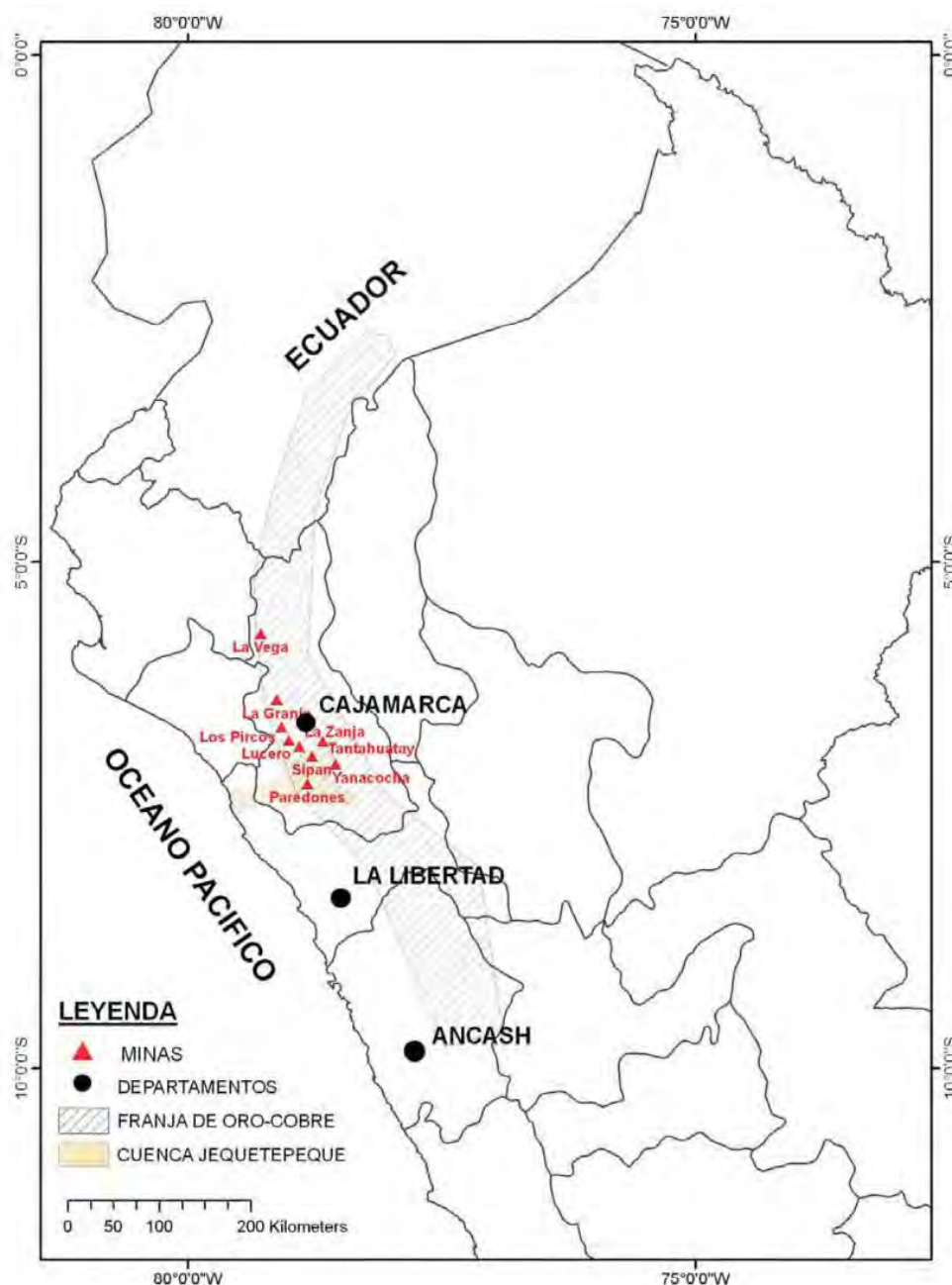


Figura 20. Franja de oro y cobre del norte del Perú. (Fuente: Chira *et al.* 2007)

4.4 Aspectos socioeconómicos.

En la cuenca del Jequetepeque se desarrollan actividades productivas como la agricultura, la pesca, la producción de lácteos, la producción de energía hidroeléctrica, comercio, ganadería y minería. De todas ellas, la agricultura es la actividad de mayor importancia, ocupando a aproximadamente 65% de la población económicamente activa (INRENA, 2004). Asimismo, se ha

logrado incrementar la producción agrícola debido al funcionamiento de la represa de Gallito Ciego alcanzando valor bruto de producción de 80,6 millones de dólares (Girón, 2003).

La superficie agrícola aproximada en la cuenca alta es 69 675 ha, 22 051,50 ha de las cuales se cultivan aproximadamente cada año. Entre los principales cultivos están: el trigo, el maíz amiláceo y el arroz. En esta zona, el riego para la agricultura depende más de las condiciones climáticas y de la lluvia (Girón, 2003).

La superficie agrícola en la cuenca baja se aproxima a 42 836 ha, 36 000 de las cuales se utilizan para la producción agrícola dependiendo de la disponibilidad del recurso hídrico. Entre los principales productos se encuentran el arroz y el maíz, siendo el primero el de mayor relevancia, ocupando aproximadamente 70% del área cultivada. En esta zona se utiliza tecnología moderna para la producción del arroz, principalmente en los distritos de San Pedro, Limoncarro, Pacanga y Chepén (Girón, 2003).

Aproximadamente 29,2% de la extensión de la cuenca es utilizada para la producción pecuaria usando pastos naturales. La actividad ganadera tiene una gran importancia en la producción regional, tanto en la producción de leche como de carne (Girón, 2003).

En la cuenca alta se desarrolla la producción lechera. El distrito de Llapa posee 25% de la producción lechera, mientras que los distritos de San Miguel, Asunción, El Prado, Contumaza, Agua Blanca y Calquis poseen 38% de la producción en conjunto. Esta producción es comercializada principalmente por INCALAC-Nestlé (Girón, 2003).

En la cuenca baja se encuentran los principales centros de engorde del ganado, las cuales se ubican en los distritos de Chepen, Pueblo Nuevo y San Pedro de Lloc. Por tal motivo, la producción pecuaria en esta zona es principalmente comercial. Otra actividad importante es la crianza de aves para la producción de carne y huevos (Girón, 2003).

En la cuenca existen diversas reservas de minerales metálicos y no metálicos. Por ejemplo, en la provincia de San Miguel existen canteras de caliche – arcilla y en Coshuro (distrito de Calquis) una mina de hierro y plata que fue descubierta en 1868. Además, se encuentran las mineras Yanacocha y Sipán, en la parte alta de la cuenca, siendo la minera Yanacocha una de las más representativas del país (Girón, 2003).

En la cuenca del Jequetepeque existen cinco centrales hidroeléctricas. Una de ellas es la central Gallito Ciego ubicada en el distrito de Yonán, provincia de Contumazá y produce 34 MW. Existen tres centrales térmicas ubicadas en Magdalena con una producción de 50 kW, en Llapa con una producción de 5 kW, y en Sipán con una producción de 2020 kW. Las dos primeras son para el sector público y la última para el sector privado (Girón, 2003).

4.5 Usos del territorio

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema agrícola es el principal agente productivo en la cuenca y es el que posee mayor uso del territorio. Esto se evidencia en la tabla 14 en la cual se muestra los principales usos del territorio en la cuenca.

Tabla 14. Usos del territorio en la cuenca del Jequetepeque. (Adaptado de INRENA, 2004)

Actividad	Tipo de uso	Superficie	
		Ha	%
Agrícola	Cultivos en zonas frías	20 473,13	5,92
	Cultivos en zonas templada y ganadería de vacunos	55 173,94	15,95
	Cultivos en zonas cálidas	3943,60	1,15
Pecuario	Pastos perennes y ganadería de vacunos	70 825,20	20,47
	Pastos temporales y ganadería de caprinos	141 538,06	40,91
	Pastos cultivados y ganadería de vacunos	8809,98	2,55
Forestal	Bosques caducifolios	13 644,55	3,94
	Bosques para reforestación	12 829,24	3,71
	Matorrales perennifolios	12 812,07	3,70
	Matorrales caducifolios	822,48	0,24
Minero	Minas a tajo abierto	2604,05	0,75
Poblacional	Centros urbanos	237,19	0,07
	Centros poblados rurales	-	-
Otras aplicaciones	Lagunas - piscicultura (truchas)	178,01	0,05
	Ríos- riego y cuerpo receptor de residuos	599,15	0,17
	Islas - materiales de construcción	133,20	0,04
	Reservorio - regulación de la cuenca	1324,45	0,38

4.6 Recurso hídrico

El agua que proviene del río Jequetepeque es imprescindible para el desarrollo de las diversas actividades productivas que se desarrollan en la cuenca. El río, en su trayectoria, recibe aportes de los ríos San Juan, Llamínchan, Magdalena, Huacraruco, San Miguel, Puclush, Llapa, Yanahuanga y de riachuelos y quebradas pequeñas (Peña *et al.*, 2015).

Las descargas del río Jequetepeque presentan una marcada estacionalidad pues, aproximadamente 65% se da entre los meses de febrero y abril (Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015). De ahí que la disponibilidad del recurso en temporada húmeda (enero-mayo) sea mayor a la demanda que se requiere para el riego, mientras que durante la temporada de estiaje (junio-diciembre), la disponibilidad del recurso disminuye (Girón, 2003).

En 1988, con la entrada en operación del reservorio Gallito Ciego, se intentó regular el régimen de descargas del río y realizar una mejor gestión del recurso que se deriva para la agricultura. Es así que el embalse permite la irrigación de un total de 42 000 ha de tierras agrícolas en la cuenca baja del Jequetepeque y produce energía eléctrica con una potencia de 34 000 kW anual. A pesar de la relevancia que tiene la presa para la producción agrícola, actualmente viene colmatándose por sedimentos. Se estima que la colmatación promedio de la presa se ha dado a razón de 5.54 MMC por año, y durante el período de 1987 a 1998 el total de sólidos que ingresaron a la presa es de aproximadamente 60.9 MMC (Peña *et al.*, 2015). De acuerdo los últimos estudios batimétricos realizados por HyO Ingenieros, se estima que el volumen útil de la represa es de 366,60 MMC y posee un volumen total de sedimentos retenido de 104,56 MMC, los cuales han reducido en 17,69% el volumen total del embalse (PEJEZA, 2013). La posibilidad del reúso de estos sedimentos ha sido evaluada a través del análisis físico químico de los mismos determinando que su uso no representa un riesgo para los fines agrícolas (Walter *et al.*, 2012).

4.6.1 Balance hídrico superficial

El balance hídrico tiene como fin principal contabilizar los aportes y pérdidas de agua en la cuenca. Dicho cálculo se realiza teniendo en cuenta los componentes del ciclo hidrológico: precipitación, evaporación, escorrentía e infiltración, transpiración, percolación, entre otros. En el estudio realizado por Peña *et al.*, (2015) se muestra que el promedio anual de precipitación es de 574,26 mm, la humedad relativa media fluctúa entre 71% y 89,9%, la temperatura media dentro de la cuenca varía desde 23°C en el desierto costero (400-800 m s. n. m.) hasta 10°C en la zona andina, las horas de sol mensual fluctúan entre 178 y 187 horas, la escorrentía superficial muestra una aportación específica de 137,41 mm/año y la infiltración asciende a 45,92 mm/año. En base a dichos datos se determinó que el balance hídrico posee una variación de reservas de aproximadamente 1102,68 MMC al año, lo cual indica que la cuenca posee una gran capacidad de recarga.

4.6.2 Usos del agua

El uso del agua en la cuenca del río Jequetepeque se da principalmente por los siguientes sectores: agrícola, poblacional, pecuario, industrial, minero e hidroenergético, de los cuales, el uso agrícola demanda aproximadamente 98% del total de agua de la cuenca, que asciende a 719 410 000 m³ anuales. El uso de agua para consumo poblacional asciende a 6 270 000 m³ en total, siendo la ciudad de Chépén la mayor consumidora con 78,5% del total. El uso pecuario del agua asciende a 1 258 000 m³ anuales, de los cuales, el vacuno es el principal consumidor con 647 000 m³. Los usos minero e industrial consumen en total un aproximado a 601 000 m³ de agua, lo que representa 0,1% del total de agua de la cuenca (Girón, 2003; INRENA, 2004).

4.6.3 Erosión hídrica y salinización

La erosión es considerada una fuente no puntual de contaminación del agua. Un estudio reciente ha estimado que la pérdida de nutrientes por la actividad agrícola y de sedimentos hacia los cuerpos de agua asciende a \$426 millones en la cuenca del Jequetepeque (Rosas, 2016). En la zona alta de la cuenca, aproximadamente 50% de las tierras agrícolas sufren un proceso de erosión entre ligero y moderado, mientras que en la zona baja el principal problema es la salinización que afecta a 28,5% de los suelos por el sobreuso del agua (Peña *et al.*, 2015).

La erosión de los suelos en la zona alta de la cuenca se debe principalmente al uso intensivo de los suelos en cultivos y pastizales. Además, los procesos de erosión hídrica se dan principalmente en periodos de avenida, que son favorecidos por el tipo de suelo, pendiente y por la actividad humana. Esta última influye en este proceso a través del tipo de uso de las tierras en la parte alta de la cuenca, lo cual genera un debilitamiento de las tierras y, en consecuencia, el transporte de sedimentos. A esto se le adicionan las características geomorfológicas de la cuenca y los procesos dinámicos, que ocasionan una gran inestabilidad de la cuenca. Debido a ello, la represa Gallito Ciego viene sufriendo una colmatación acelerada por la sedimentación acumulada (Tavares Corrêa y Rondón Ramírez, 2015).

La acumulación de sales en los suelos es uno de los mayores problemas en la parte baja y media de la cuenca. Este problema se origina por el transporte de sales disueltas que provienen de la parte alta de la cuenca a la parte baja, lugar donde asciende desde la napa freática hacia la superficie del suelo y trae, como consecuencia, la pérdida paulatina de suelo para producción agrícola. La salinización de los suelos se agrava por el uso intensivo de agua para los cultivos en los meses de avenida principalmente y por realizar los cultivos en áreas no adecuadas. Esto permite la recarga y elevación de la napa freática y la salinización de los suelos (Peña *et al.*, 2015).

Algunos estudios han analizado la salinización de los suelos con distintos fines. Corcuera (2016) evaluó el grado de salinidad de los suelos con el fin de analizar la fertilidad de los mismos para el

cultivo de arroz a través del análisis de parámetros fisicoquímicos en muestras de agua y suelos como textura, densidad aparente, humedad, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenidos de nitrógeno, carbono inorgánico, cationes solubles e intercambiables (Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^{+2}), cloruros, carbonatos, sulfatos y fosfatos disponibles. El estudio determinó que los suelos presentan las condiciones necesarias en cuanto a nutrientes para el cultivo de arroz, y que la salinización por las aguas utilizadas para dicho uso alcanza nivel de riesgo moderado.

Jahnsen (2013) y Fox (2013) evaluaron el impacto de la construcción de la represa Gallito Ciego en la pérdida de tierras de cultivo por salinización en la cuenca baja del Jequetepeque y San Pedro de Lloc, respectivamente, durante el periodo 1980-2003. Estos estudios se llevaron a cabo a través del análisis cartográfico espacio-temporal y de muestras de suelos analizando la textura, materia orgánica, pH y conductividad. El estudio de Jahnsen (2013) determinó que se perdieron 256,19 ha, y que la salinidad de los suelos era ligeramente salina o no salina, y el estudio de Fox (2013) determinó que en el sector de San Pedro de Lloc se perdió 4.87 km² de área de cultivo y que la salinidad de los suelos variaba desde no salino hasta extremadamente salino a medida que se acercaban a la costa. El análisis conjunto permitió concluir que la pérdida de suelos por salinización a partir de la construcción de la represa no era significativa.

Marchese (2015) estudió la salinización de los suelos agrícolas en San Pedro de Lloc a través del análisis fisicoquímico de los parámetros textura, densidad aparente, humedad, pH, conductividad eléctrica, carbono inorgánico, sodio, potasio, magnesio, materia orgánica, carbono inorgánico, relación C/N, cloruros, sulfatos y nitratos. El estudio determinó que los suelos varían de ligeramente a extremadamente salinos, y que el distrito de San Pedro de Lloc está atravesando un serio problema de salinización debido principalmente a las malas prácticas agrícolas.

4.6.4 Calidad del agua

Los vertimientos provenientes de la agricultura, industria, minería y de la población son las fuentes principales de contaminación de las aguas de la cuenca. La actividad agrícola utiliza plaguicidas y fertilizantes, los cuales se incorporan a los cuerpos de agua y los contaminan. De igual manera, la actividad minera vierte sus aguas residuales, las cuales contribuyen a la contaminación de las aguas con metales pesados, residuos de cianuro, etc. El vertimiento de las aguas residuales domésticas sin tratamiento previo afecta la calidad de las aguas de la cuenca (Girón, 2003).

En el año 2013, el MINAGRI a través del área de Operación, Hidrología y Auscultación (OHA), realizó un muestreo de las aguas del río Jequetepeque desde Chilete hasta el puente Tolón pasando por la represa Gallito Ciego. La finalidad del estudio era determinar el estado de la calidad del agua del río. Los parámetros analizados en las muestras fueron: pH, cianuro total y WAS, y metales disueltos (Se, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Fe, As, Hg y Cr) (MINAGRI, 2013). Como resultado se encontró que el pH se encontraba básico (8.5) para dos estaciones de muestreo, el contenido

de cianuro total presentaba concentraciones menores a los límites máximos permisibles (LMP = 0.1 mg/l) en todos los puntos de muestreo, y el contenido de metales disueltos se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles (MINAGRI, 2013).

Otros estudios se han centrado en estudiar el posible uso de sedimentos para la agricultura en la cuenca del Jequetepeque (Walter *et al.*, 2012), determinar cuantitativamente el contenido de nitratos en aguas subterráneas en el distrito de San Pedro de Lloc (Vinelli, 2012), diseñar un programa de monitoreo de agua superficial en San Pedro de Lloc (Quispe, 2008), estudio de sedimentos de la represa Gallito Ciego como contribución al estudio de calidad ambiental del reservorio (Ríos, 2013), y analizar la influencia de la represa en la calidad del agua en la parte inferior de la cuenca (Matienzo, 2014). En los estudios mencionados se realizaron monitoreos de agua, sedimentos y suelos, los cuales fueron analizados fisicoquímicamente. Por ejemplo, en el estudio realizado por Ríos (2013) se analizaron los siguientes parámetros: pH, conductividad, cloruros, carbonatos, materia orgánica, nitrógeno orgánico, fósforo total, magnesio, calcio, sodio, hierro, zinc, cobre, cadmio, plomo y cromo. De igual manera, el estudio realizado por Matienzo (2014) permitió evidenciar la influencia de las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua en la cuenca baja del Jequetepeque, la función del río como medio de transporte que favorece procesos de eutrofización en el área de la represa, la influencia de los efluentes domésticos en la calidad del recurso y la capacidad como sumidero de la represa que permite la acumulación de sedimentos, que a su vez favorecen el incremento de material orgánico en la cuenca baja del río. El estudio de Yacoub (2013) permitió conocer los efectos que tiene la minería sobre la calidad de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca. Para ello, analizó elementos traza en muestras de sedimentos y agua, aplicó modelos computacionales y estadísticos que caracterizaron la cuenca, desarrolló un sistema de monitoreo de calidad del agua, evaluó el riesgo asociado, el efecto sobre la salud humana y las fuentes de contaminación de las diversas sustancias en la cuenca (Yacoub, 2013).

5 METODOLOGÍA

En esta tesis se aplicaron las herramientas estadísticas de análisis multivariado - análisis de clúster jerárquico (ACJ) y el análisis factorial (AF) - con el fin de determinar la relevancia estadística de las estaciones de monitoreo y de los parámetros fisicoquímicos analizados en muestras de agua recolectadas en una red de monitoreo en la cuenca del Jequetepeque. Para ello, se dispone de la base de datos que proviene del monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Estas bases de datos públicas se encuentran en los siguientes informes técnicos (ANA, 2015b, 2015c, 2016b, 2016e):

- Primer monitoreo participativo de la calidad del agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque del año 2015, N°017-2015-ANA-AAA.JZ-SDGCRH/FZAY
- Segundo monitoreo participativo de la calidad del agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque del año 2015, N°004-2016-ANA-AAA.JZ-SDGCRH/FZAY
- Primer monitoreo participativo de la calidad del agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque del año 2016, N°002-2016-ANA-AAA.JZ-SDGCRH/GBR
- Primer monitoreo participativo de la calidad del agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque del año 2016, N°034-2016-ANA-AAA.JZ-SDGCRH/MCL

5.1 Datos iniciales

Los monitoreos de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque ejecutados por la ANA se realizaron en cuatro campañas durante el periodo de julio del 2015 a octubre del 2016. Las campañas realizadas en periodos de estiaje se realizaron entre mayo y junio del 2015 y en el mismo periodo del 2016, las cuales son etiquetadas como 2015-1 y 2016-1, respectivamente. Las campañas realizadas en época de avenida se realizaron entre la última semana de setiembre y la primera semana de octubre del 2015 y en el mismo periodo del 2016, etiquetadas como 2015-2 y 2016-2, respectivamente. Las coordenadas geográficas (en UTM) de las dieciocho estaciones monitoreadas en el 2015-1, diecinueve estaciones en el 2015-2, veinte estaciones en el 2016-1 y dieciocho estaciones en el 2016-2, se muestran en la tabla A (anexos), y sus ubicaciones espaciales se muestran en la figura 21. En la tabla B (anexos) se muestra los 48 parámetros físicos, químicos y biológicos monitoreados en dichas estaciones.

Por otra parte, la ausencia de valores o la presencia de valores nulos de concentración de los parámetros en ciertos puntos suele deberse a la limitación de los instrumentos. Por ello, estos datos se imputan por otros datos utilizando algún método ya establecido. Los métodos de imputación utilizados en esta tesis son la imputación por la media y por los límites de detección.

Los límites de detección utilizados en esta tesis se muestran en la tabla 15 y son los reportados por la informes técnicos de la ANA.

Tabla 15. Límites de detección utilizados en esta tesis

Especie	2015-1	2015-2	2016-1	2016-2
Nitratos (mg/L)	0,030	0,050	0,050	0,050
Sólidos suspendidos totales (TSS) (mg/L)	3,000	1,000	1,000	1,000
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	1,800	1,800	1,800	1,800
Boro (mg/L)	0,002	0,008	0,008	0,008
Cobre (mg/L)	0,000	0,002	0,002	0,002
Hierro (mg/L)	0,002	0,003	0,003	0,003
Litio (mg/L)	0,003	0,001	0,001	0,001
Zinc (mg/L)	0,002	0,004	0,004	0,004

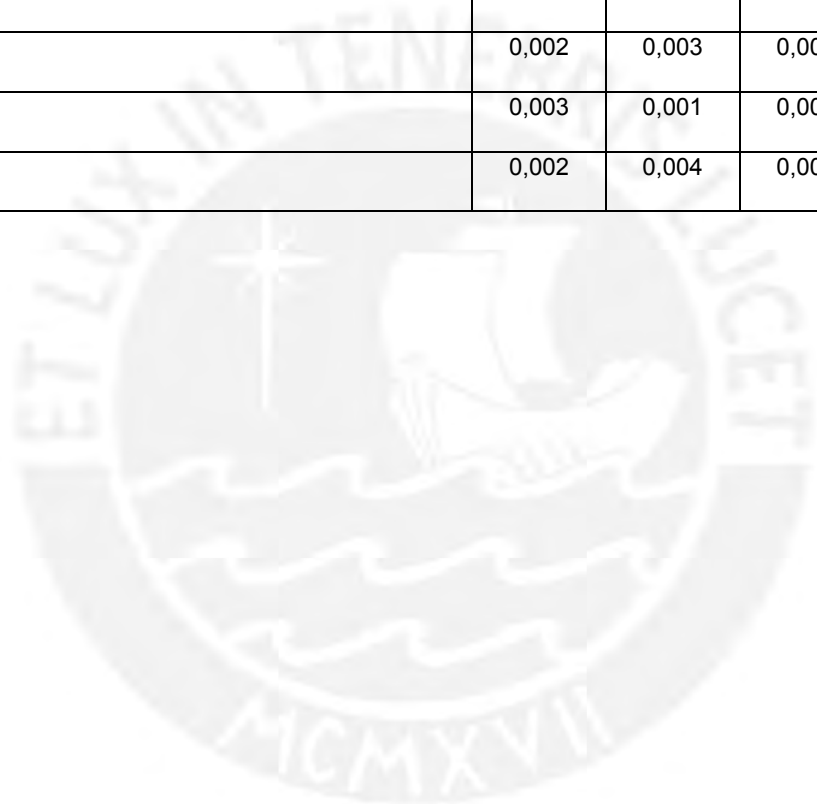




Figura 21. Estaciones monitoreadas por la ANA durante el periodo 2015-2016 (Elaboración propia en ArcGis 10.2. Fuente: Sinia)

5.2 Datos finales

De todas las estaciones de monitoreo del estudio realizado por la ANA, se consideraron únicamente a las estaciones de monitoreo que poseen datos completos y que se han monitoreado en los dos periodos en ambos años (2015 y 2016). Es así que, para esta tesis, se tomaron en cuenta las estaciones de monitoreo que se muestran en la tabla C (anexos); su distribución en el mapa se muestra en la figura 22. De los 48 parámetros analizados por la ANA, se eliminaron aquellos que no presentaron algún valor como resultado de su medición, así como los que requieren imputar más de 50% de sus datos. Los parámetros y las abreviaturas correspondientes utilizados en esta tesis se muestran en la tabla D (anexos).

Una vez obtenidos los parámetros finales que se incluyen en el análisis multivariado, se procedió a realizar la imputación de los datos por el límite de detección correspondiente. Debido a que en el informe presentado por la ANA, los parámetros oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno, temperatura y conductividad eléctrica no presentaban los límites de detección correspondientes, se realizó la imputación de los datos por la media o promedio. Esto se debe principalmente al rango de medición de los instrumentos (multiparámetros) utilizados en campo. Algunos instrumentos poseen un rango de medición como en el caso de la temperatura que puede ir desde 0-60 °C por ejemplo. La imputación por alguno de estos valores máximos del rango introduciría un error en el posterior análisis de los datos. Finalmente, se obtuvieron los datos finales para realizar el análisis multivariado los cuales se muestran en la tabla E (anexos).

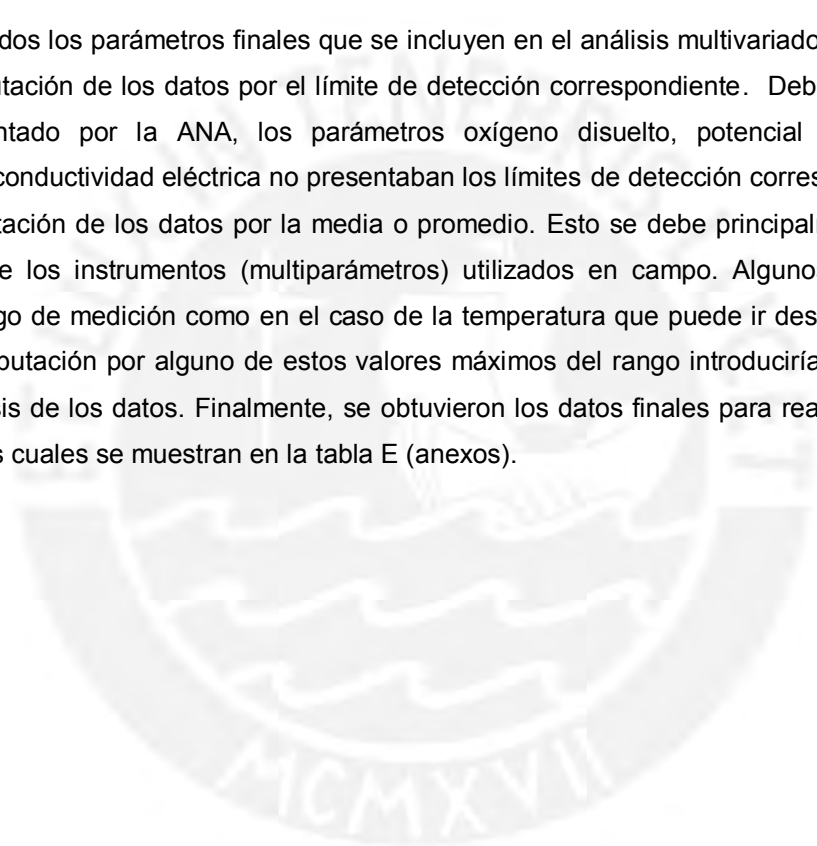




Figura 22. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo del estudio de la ANA considerados en esta tesis. (Elaboración propia en ArcGIS 10.2. Fuente: Sinia)

En la figura 23 se muestra la distribución de las estaciones de monitoreo sobre las principales formaciones geológicas en las cuales se encuentran ubicadas, y en la tabla 16 se resumen los principales compuestos que predominan dichas formaciones geológicas (Allaby, 2013; Chira *et al.*, 2007; Davila, 1997; Druc *et al.*, 2013; INGEMMET, 2014; Le Bas y Streckeisen, 1991; Mendoza, 2005; Peña *et al.*, 2015). En ella se muestra la gran variedad de minerales que conforman cada formación geológica que predominan sobre las estaciones de monitoreo. De esa manera, las estaciones que se encuentran en la parte alta están principalmente influenciadas por formaciones volcánicas, mientras que las estaciones que se encuentran en la parte baja, están influenciadas principalmente por material sedimentario. Esto otorga diferencias y semejanzas en cuanto a la influencia que tiene las aguas en cada estación y en consecuencia influyen en la formación de los grupos por el análisis multivariado.



Tabla 16. Distribución de las estaciones de monitoreo en las formaciones geológicas

Estaciones de monitoreo	Formación geológica	Composición química
Qmina, Qojos, Ryana	Volc. Llama. Consiste de un conglomerado rojizo de base que generalmente está formado de brechas andesíticas. Sobre el conglomerado normalmente se encuentra una secuencia gruesa de piroclásticos.	La andesita es una roca volcánica compuesta principalmente de afanita y con características porfíroides. La composición del mineral está constituida por albita (formado por elementos de Al, Si y Na), anortita (formado por elementos de Ca, Al, Si), por minerales ferromagnéticos como piroxeno, biotita y hornblenda (formado por elementos de Ca, Fe, Na, Mn, Li, Mg, Cr, Al, Si, Sc, y F).
Rrejo, Rtint, Rsmig, Rllam	Grupo Calipuy. Consiste de depositos de andesita, textura afanítica a porfíritica, pasando por una secuencia de aglomerados y piroclastos, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno.	La composición mineral está constituida por albita, anortita, piroxeno y anfíbol (conjunto de minerales de silicatos que contiene metales como el Zn, Li, Na, Mg, Fe, Mn, Ca, Co, Cr, Ti, Zr, F, Cl, K, y Pb)
Qshill	Volc. Porculla. Consiste principalmente de material piroclástico riolítico a riodacítico acompañada de lavas andesíticas.	La composición mineral posee un alto contenido en Hierro y magnesio, y está compuesto principalmente de andesita y riolita. Por lo tanto, contiene Albita, Anortita, piroxeno, biotita, hornblenda, cuarzo y feldespato (formado por elementos de Al, Ca, Si, K y Mg)
RJequ2, RJequ5, RJequ12, RJequ11, RJequ10, RJequ9, RJequ8, RJequ7, RJequ6	Depósitos fluviales recientes, arenas y arenas gravosas. Estos se encuentran en llanuras dejadas por los pasos de los ríos. Los depósitos van desde cantos redondeados con arenas finas, medias y gruesas.	La composición de los depósitos principalmente proviene del material sedimentario de las rocas. Estas están compuestas por arena, arcilla y limo. Los cuales, a su vez, están compuestos por feldespatos, Yeso, caliza y silicatos (formado por elementos de Si, Ca, Mg, Al, Na y otros metales que puedan contener en los sedimentos)

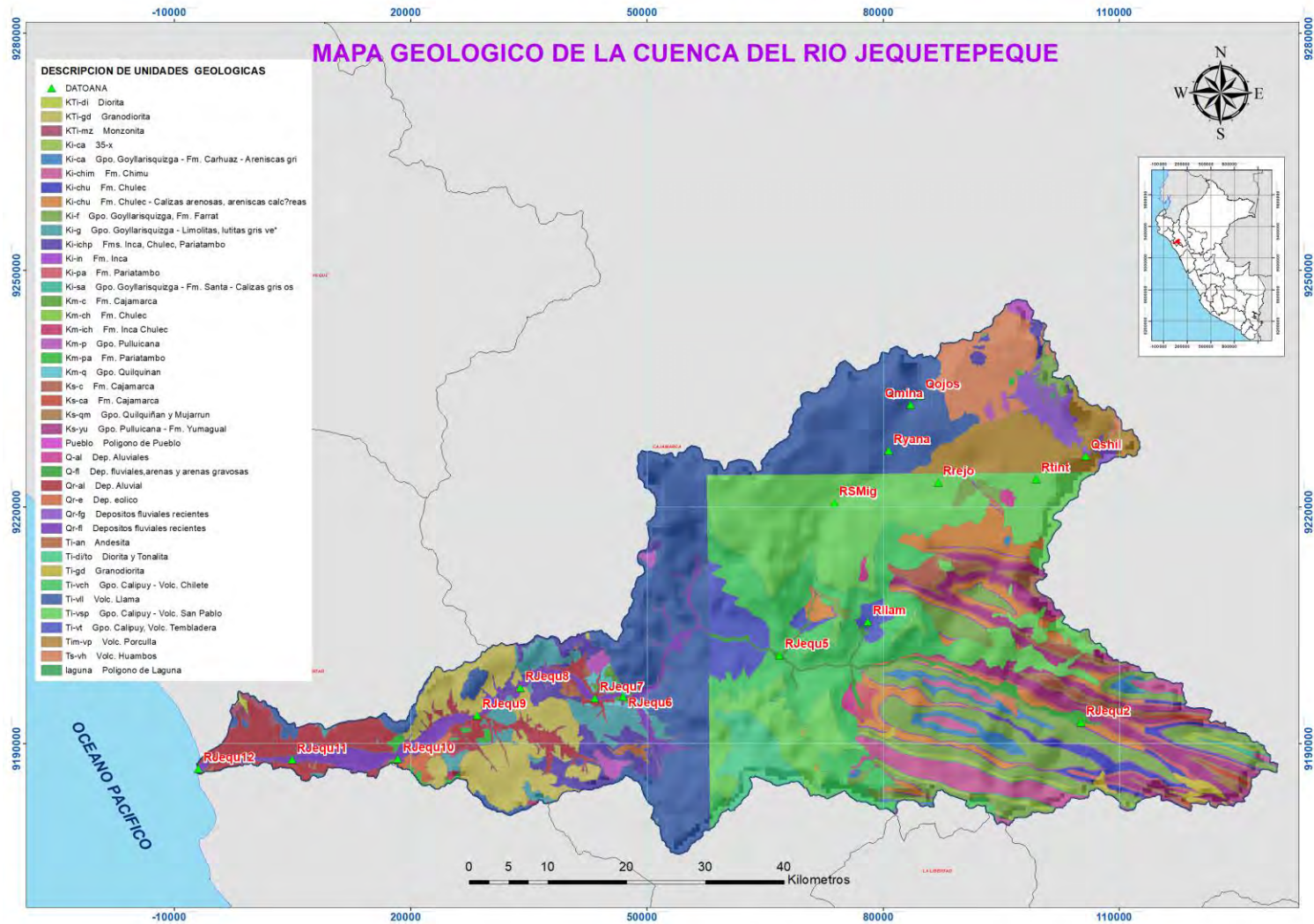


Figura 23. Distribución de las estaciones de monitoreo en el mapa geológico de la cuenca (Elaboración propia en ArcGis 10.2. Fuente: Sinia)

5.3 Método estadístico

5.3.1 Análisis y pretratamiento de datos

Todos los datos fueron recolectados en hojas de cálculo de Excel versión 2010. El primer paso para el análisis y pretratamiento de datos consistió en eliminar las estaciones que no poseían la información requerida para el análisis multivariado. Este procedimiento es necesario porque el análisis multivariado requiere que la información y los datos estén completos (Useche y Mesa, 2006). De igual manera, se procedió a eliminar los parámetros fisicoquímicos que no poseen datos como resultado de su medición, así como aquellos que requieren la imputación por encima de 50% de los datos. Estos son descartados pues restan variabilidad a la base de datos, requisito para aplicar las técnicas de análisis multivariado (Hair *et al.*, 2014). Una vez obtenida la base de datos finales, tabla E (anexos), se procedió a exportarla al paquete estadístico IBM SPSS Statistics 22.0. Esta base de datos cuenta con un total de sesenta y ocho casos y veinte variables.

5.3.2 Análisis multivariado

La metodología para el análisis multivariado sigue el siguiente proceso:

- 1) Análisis de Clúster Jerárquico para las estaciones
- 2) Análisis de Factorial considerando a los parámetros como variables

El **ACJ para las estaciones** se realizó a los datos autoescalados del promedio de los datos de los parámetros para cada estación que, a su vez, provienen de la transformación Box-Cox de los datos finales obtenidos del tratamiento y análisis previo de los datos iniciales. Para el ACJ se utilizó como método de agrupación de clústeres el método de Ward y como medida de distancia la euclídea al cuadrado. El resultado final es un dendrograma en el que se visualiza la agrupación de las estaciones, debido a que el agrupamiento se configura para agrupar a los casos que, en este caso, son las estaciones. Las estaciones que posean una mayor distancia serán aquellas que se encuentren menos correlacionadas con las demás y por lo tanto serán las menos relevantes para la red, tal como se ha reportado en la literatura (Noori *et al.*, 2010; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005).

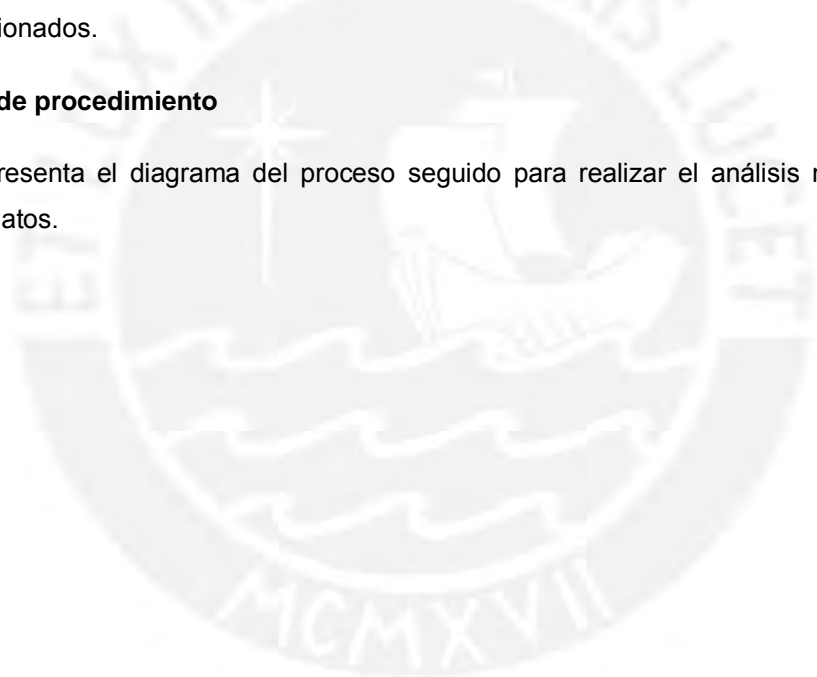
El **AF se aplicó** a los datos estandarizados de los parámetros fisicoquímicos previamente transformados, via Box y Cox. Se aplicó el método de ACP como método de extracción de factores y la rotación Varimax para maximizar las cargas factoriales. Los parámetros que posean menores cargas factoriales serán aquellos que se encuentren menos correlacionados con los demás y por lo tanto serán los menos relevantes para la red, tal como se ha reportado en la literatura (Noori *et al.*, 2010; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005).

Una vez obtenida la matriz que muestra el número de factores, se procedió a graficar las coordinaciones entre las puntuaciones de los factores, donde las puntuaciones de uno de los factores van al eje X y las puntuaciones de otro de los factores van al eje Y. La selección de los factores que van en cada eje depende del número de factores y de lo que se desee visualizar de dicha gráfica. Por ejemplo, si se obtienen dos factores se tendrá solo un gráfico que muestre las coordinaciones del factor 1 vs. factor 2. Si se obtienen tres factores, se puede tener un mayor número de gráficos; por tal motivo, se seleccionan aquellos factores que brinden la mayor información.

Seguidamente, se realizó el autoescalado de los datos obtenidos en los factores y el cálculo de los promedios de las puntuaciones factoriales de cada estación sobre cada factor. Este último proceso se ejecuta únicamente con la finalidad de que sea menos densa la representación gráfica entre los valores autoescalados de los factores con las puntuaciones factoriales. El gráfico final describe de manera general la influencia de los principales parámetros sobre las estaciones de acuerdo a los factores seleccionados.

5.4 Diagrama de procedimiento

La figura 24 presenta el diagrama del proceso seguido para realizar el análisis multivariado en cada base de datos.



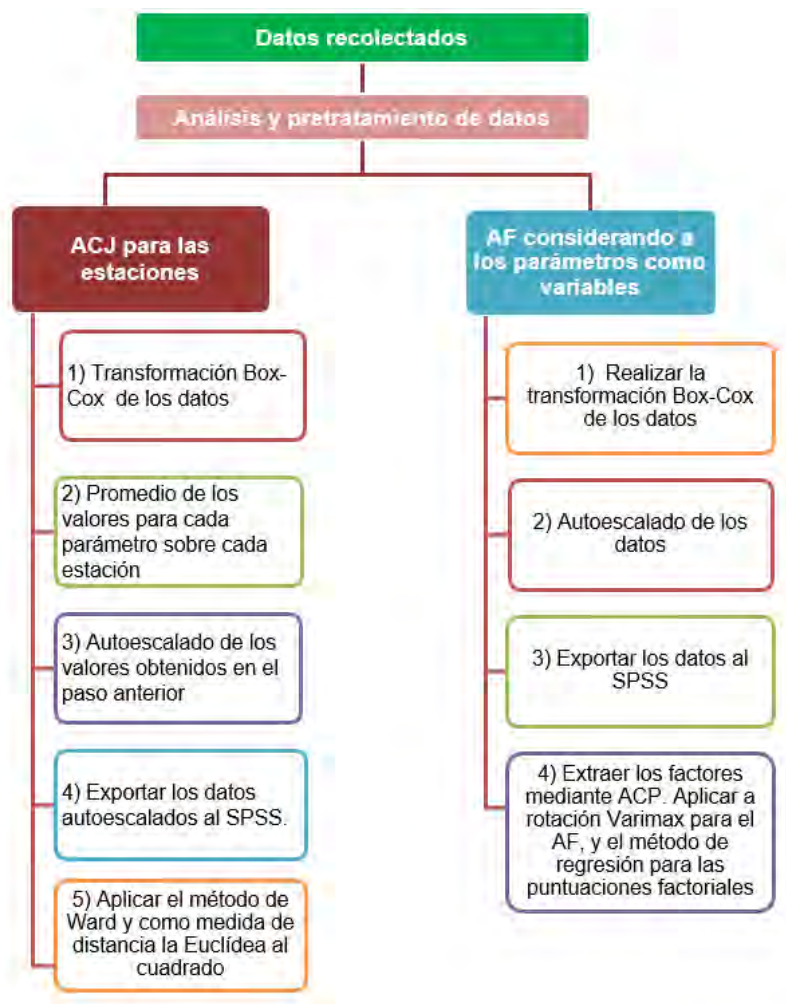


Figura 24. Proceso del análisis multivariado aplicado (fuente propia)

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis multivariado

6.1.1 Análisis de agrupamiento jerárquico

El análisis de clúster jerárquico (ACJ) se realizó para las estaciones a la base de datos finales, tal como se mencionó en la metodología. Los resultados finales del agrupamiento de las estaciones de monitoreo se muestran en figuras que contienen los dendogramas.

La figura 25 muestra el dendrograma obtenido del ACJ de las estaciones de monitoreo considerando la data anual. En ella se observa la formación de tres grupos al final del ACJ a los que se ha denominado GRUPO 1, GRUPO 2 y GRUPO 3. En el GRUPO 1, el GRUPO-1-A es el primero en formarse pues posee menor distancia, y está formado por dos subgrupos, el grupo que está conformado por RJequ8 y RJequ9, y el grupo conformado por RJequ5, RJequ6 y RJequ7. Luego, se forma el GRUPO-1-B y, finalmente, los integrantes del GRUPO-1-C se agrupan consecutivamente a los grupos anteriores. En el GRUPO 2, el primer grupo que se forma es el GRUPO-2-A, luego cada integrante del GRUPO-2-B se va uniendo al GRUPO-2-A consecutivamente. Finalmente, el GRUPO 3 es el que se encuentra más alejado. En la tabla 17 se aprecian los integrantes de los grupos.

Tabla 17. Grupos formados del ACJ de las estaciones para el período anual

Grupos		Estaciones que conformane el grupo
Grupo 1	Grupo-1-A	RJequ8, RJequ9, RJequ5, RJequ7, RJequ6
	Grupo-1-B	RJequ10, RJequ11
	Grupo-1-C	Rllam, RJequ2, RJequ12
Grupo 2	Grupo-2-A	Rrejo, Rtint
	Grupo-2-B	Ryana, Qojos, Qshill, RSMig
Grupo 3		Qmina

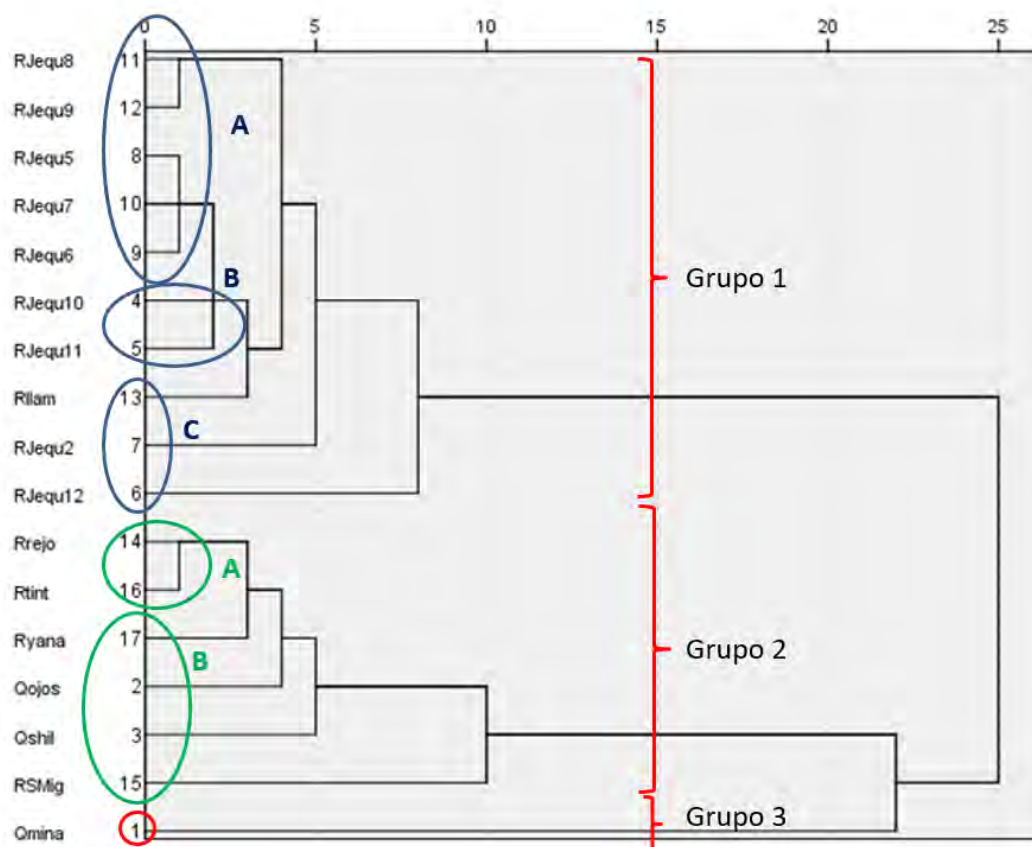


Figura 25. Dendrograma de las estaciones de monitoreo para el periodo anual

En base al dendrograma mostrado en la figura 25, se puede decir que las estaciones que pertenecen al GRUPO-1-A poseen un alto grado de agrupamiento reflejando que las características asociadas a estas estaciones de monitoreo le otorgan un alto grado de similitud. Esto se puede deber a que las estaciones pertenecientes a este grupo se encuentran espacialmente muy cerca, tal como se visualiza en el mapa mostrado en la figura 22. El siguiente grupo formado, el GRUPO-1-B, se encuentra espacialmente más alejado del GRUPO-1-A, ya que se encuentran en una cota más baja de la cuenca. Ambas estaciones que forman el GRUPO-1-B, RJequ10 y RJequ11, se encuentran muy próximas espacialmente, revelando que el agrupamiento de ambas se debe a la alta similitud en sus características. Finalmente, de las estaciones de monitoreo que integran el GRUPO-1-C, la estación Rllam se agrupa a los GRUPOS 1-A y 1-B a una menor distancia que las estaciones RJequ2 y RJequ12. Esto se puede deber a que la estación Rllam se encuentra espacialmente más cerca a los GRUPOS 1-A y 1-B que a las estaciones RJequ2 y RJequ12, que a su vez se encuentran en puntos extremos en la cuenca del río Jequetepeque, tal como se muestra en la figura 22.

Del GRUPO-2, el GRUPO-2-A tiene menor distancia, posee un alto grado de agrupamiento, lo que indica un alto grado de similitud en sus características. Este grado de similitud se va disipando tal

como se ve en el GRUPO-2-B, puesto que cada integrante del GRUPO-2-B se va agrupando a una mayor distancia al GRUPO-2-A. Finalmente, aquella estación que posee menor grado de similitud con toda la red de monitoreo pertenece al GRUPO-3, la estación Qmina.

Además, se puede observar que a una mayor distancia el GRUPO 2 y GRUPO-3 se unen y forman un solo grupo. Esto se puede deber a que estas estaciones se encuentran más cercanas a los recintos mineros y a una cota mayor que las estaciones que conforman el GRUPO 1, por lo tanto, la influencia de la actividad minera en el GRUPO 2 y GRUPO 3 predomina en comparación al GRUPO 1. Esto se debe a que la formación de los grupos se basa las características fisicoquímicas de las aguas de cada estación de monitoreo, las cuales son influenciadas por las características geográficas, geológicas, demográficas y a las diversas actividades socioeconómicas que se desarrollen en la cuenca. De ahí que, si bien en toda la cuenca se realiza la actividad agrícola, las actividades extractivas en la parte alta de la cuenca marcan la diferencia con la parte baja.

En la tabla 18 se muestra los perfiles de los grupos formados por el ACJ en la figura 25. Para ello se ha tomado el promedio de cada variable por cada grupo. En la tabla se observa que el GRUPO 1 de estaciones, los cuales están distribuidos en la parte baja de la cuenca, estan influenciados por los parámetros que contribuyen principalmente a la salinización y que incrementan la conductividad eléctrica. El GRUPO 2 se encuentra influenciado por los parámetros metales trazas. Estos resultados demuestran que la agrupación guarda relación con las características naturales (geológicas) y con las actividades antropogénicas que se desarrollan en la cuenca y que influyen en la calidad del agua del río. Además, se observa que la estación Qmina posee valores que pueden ser considerados atípicos en relación a los datos que determinan la formación del GRUPO 1 y GRUPO 2. Estas concentraciones pueden ser resultado de la contribución minera puesto que esta estación se encuentra en la zona donde se desarrolla dicha actividad extractiva. Esto se refleja en los valores promedios de pH, Al, Cu y Mn, los cuales exceden los ECA para la categoría 3, categoría asignada a la cuenca del río Jequetepeque. Por lo tanto, decir que esta estación es menos relevante para la red de monitoreo debido a que posee mayor distancia no sería correcto, puesto esta estación debe ser considerada como atípica y debe prestarse particular atención a ella.

Tabla 18. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ

Parámetros	Grupo 1 (parte baja)	Grupo 2 (parte alta)	Grupo 3 (Qmina)
OD	7,621	5,160	4,413
pH	8,285	8,041	5,068
Temp	24,901	13,657	14,503
CE	506,410	306,085	894,125
Nitratos	0,299	0,501	0,316
TSS	8,147	8,075	14,183
coliformes fecales	699,340	3373,400	21,150

Al	0,235	0,369	4,901
B	0,096	0,012	0,093
Ba	0,046	0,028	0,018
Ca	57,162	39,121	318,225
Cu	0,006	0,010	0,411
Fe	0,150	0,295	1,740
K	9,507	1,435	1,900
Li	0,008	0,002	0,023
Mg	11,833	2,984	18,515
Mn	0,054	0,038	1,852
Na	223,028	4,854	6,530
Sr	0,415	0,206	0,892
Zn	0,008	0,021	0,211

6.1.2 Análisis factorial

El análisis factorial (AF) se realizó a la base de datos finales considerando a los parámetros como variables. Se aplicó el AF a la matriz de datos transformados y autoescalados. Los resultados finales del AF se muestran a través de la matriz de factores y mediante gráficos específicos para cada caso.

Al realizar el AF se obtienen cuatro factores sin rotar que explican la mayor cantidad de varianza (70,86%), tal como se muestra en la tabla 19. Las cargas factoriales de los parámetros por cada factor sin rotar se muestran en la tabla 20. La información de esta tabla se puede expresar a través de gráficas bidimensionales en las que se muestren las coordinaciones de las cargas factoriales entre los factores.

Tabla 19. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para el periodo anual

Factores	Total	% de varianza	% acumulado
1	6,271	31,355	31,355
2	4,348	21,742	53,097
3	2,402	12,008	65,105
4	1,151	5,753	70,858
5	,973	4,865	75,723
6	,889	4,446	80,169
7	,851	4,257	84,425
8	,656	3,280	87,705
9	,492	2,460	90,166

10	,411	2,056	92,222
11	,309	1,547	93,769
12	,262	1,309	95,078
13	,236	1,182	96,260
14	,226	1,130	97,390
15	,178	,890	98,280
16	,113	,565	98,845
17	,094	,472	99,317
18	,079	,395	99,712
19	,034	,168	99,880
20	,024	,120	100,000

Tabla 20. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para el periodo anual

Variables	F1	F2	F3	F4
OD	0,547	-0,413	0,528	0,011
pH	0,044	-0,850	-0,070	0,086
Temp	0,609	-0,393	0,294	-0,098
CE	0,782	0,180	-0,250	-0,085
Nitratos	-0,052	0,131	-0,620	0,013
TSS	0,060	0,285	0,701	0,037
ColFec	-0,169	-0,269	0,284	0,656
Al	-0,348	0,642	0,360	-0,291
B	0,691	0,106	0,393	-0,131
Ba	0,766	-0,331	-0,149	0,266
Ca	0,706	0,574	-0,282	-0,077
Cu	-0,394	0,680	-0,140	0,063
Fe	-0,233	0,629	0,642	0,147
K	0,554	0,308	-0,237	0,506
Li	0,477	0,443	-0,037	-0,212
Mg	0,902	0,249	0,100	-0,046
Mn	0,236	0,729	0,133	0,336
Na	0,918	-0,156	0,110	0,059
Sr	0,838	0,338	-0,217	-0,071
Zn	-0,333	0,596	-0,223	0,258

En la figura 26 se muestran las coordinaciones de las cargas factoriales entre el factor 1 y el factor 2; en ella se aprecia principalmente la formación de dos grupos de parámetros que se correlacionan con esos factores. El GRUPO 1, compuesto por Al, Fe, Cu y Zn, y el GRUPO 2, compuesto por Ca, Sr, B, Mg, CE, Na y Ba. La mayoría de estos metales están relacionados negativamente con el pH debido a que, para valores de pH más altos en un cuerpo de agua, estos tienden a precipitar y disminuyen su concentración. El efecto contrario ocurre a medida que el pH disminuye, o que un cuerpo de agua se encuentre más ácido, la concentración de metales aumenta debido a que se favorece la disolución de los compuestos que contienen estos metales (Boyd, 2015; Manahan, 2011). Adicionalmente, si el nivel de acidez disminuye el agua se torna más ácido y se favorece la disolución de los compuestos en los sólidos suspendidos debido a que la capacidad de taponamiento del suelo es excedida (Xu *et al.*, 2012).

El factor 2 está correlacionado con los metales que conforman el GRUPO 1, Cu, Zn, Fe y Al, los cuales se encuentran en la corteza terrestre en distintos minerales. Su origen está relacionado tanto a la contribución natural debido a las características geológicas de la cuenca como al desarrollo de la actividad minera. Estos metales forman parte de los componentes intermetálicos (IA) que pertenecen a los elementos nativos de acuerdo a la clasificación geológica de Strunz (Hudson Institute of Minerlogy, 2017).

El aluminio se extrae del mineral bauxita, el cual contiene óxidos e hidróxidos de este elemento, y cierto contenido de hierro (Greenwood y Earnshaw, 1999; Moore, 1990). La significancia ambiental de la producción de aluminio se ha incrementado principalmente por dos razones: el incremento de la movilización del metal debido a la acidificación de los cuerpos de agua, y su capacidad como potencial agente generador de Alzheimer y otras enfermedades relacionadas (Moore, 1990). Los impactos ambientales relacionados a la extracción de este metal en cuerpos de agua han sido ampliamente reportados (Burton *et al.*, 2012; Gardner y Bell, 2007). Por ejemplo, en Jamaica, los terrenos de cultivos fueron gravemente contaminados debido al proceso de extracción de la bauxita. Ello generó que los agricultores tuvieran que ser reubicados debido a que el río como las fuentes de agua potable se encontraban contaminados (Coke *et al.*, 1987).

El hierro se encuentra en la corteza terrestre en minerales de óxido de hierro como por ejemplo la magnetita (Fe_3O_4), siderita (FeCO_3), limonita ($\text{FeO}(\text{OH})$), pirita (FeS_2) y hematita (Fe_2O_3) (Greenwood y Earnshaw, 1999; Moore, 1990). La distribución del hierro de forma natural en los cuerpos de agua está principalmente influenciada por la meteorización y la lixiviación de los depósitos del mineral. Debido a su gran disponibilidad, la extracción de minerales de hierro a través de la minería, para la fabricación de acero principalmente, es una de las principales operaciones manufactureras a nivel mundial (Greenwood y Earnshaw, 1999). Entre los principales efectos ambientales del hierro en los cuerpos de agua se encuentran la formación de compuestos de hierro que precipitan y obstruyen el crecimiento de los huevos de los peces, la disminución de

nutrientes debido a la formación de complejos de hierro con compuestos orgánicos, el incremento de la toxicidad debido a los drenajes ácidos mineros, y el incremento de sus minerales en la carga sedimentaria debido a las actividades extractivas (Sebastian *et al.*, 2017; Vuori, 1995; Wu, Zou, Chen *et al.*, 2016).

El cobre es un metal que se encuentra en minerales, aunque también se encuentra en estado nativo. La producción de cobre se realiza principalmente mediante el minado del mineral calcopirita (CuFeS_2), aunque también se obtiene de la calcosina (CuS_2) y bornita (Cu_5FeS_4) (Allaby, 2013; Greenwood y Earnshaw, 1999; Moore, 1990). Debido a los diversos usos del cobre (electricidad, aleaciones, construcción, entre otros), la actividad minera se realiza de forma intensiva en varios países. La descarga de cobre al agua superficial trasciende los 35 000 metros cúbicos de toneladas al año, y gran parte de dicha descarga se atribuye al vertimiento de aguas domésticas, municipales e industriales, deposición atmosférica, y a las actividades extractivas. El cobre es altamente tóxico para las especies acuáticas y las plantas, motivo por el cual se utiliza en herbicidas y alguicidas (Bui *et al.*, 2016; Hochmuth *et al.*, 2014). Los impactos ambientales que tiene la extracción de los minerales de cobre han sido ampliamente reportados (Huang *et al.*, 2010; Pyatt *et al.*, 2000; Watling *et al.*, 2014). Por ejemplo, Beylot y Villeneuve (2017) realizaron un estudio en Polonia aplicando el análisis de ciclo de vida de la producción de cobre considerando los relaves ácidos producidos por la actividad minera, en el cual demostraron que estos relaves forman parte esencial en el análisis de los posibles impactos ambientales relacionados a la producción de cobre, pues el impacto se incrementa en varios órdenes de magnitud en comparación únicamente con el proceso de producción (Beylot y Villeneuve, 2017).

El zinc se encuentra principalmente en minerales como la esfalerita o blenda (ZnS), smithsonita (ZnCO_3), y willemita (Zn_2SiO_4). La producción del Zinc se ha incrementado desde los años 30 hasta la actualidad en aproximadamente 10 millones de toneladas métricas anuales. La principal fuente para obtener el zinc se realiza a través de la actividad minera (USGS, 2015). Al igual que en los otros metales, existen estudios que muestran que la actividad minera, junto con el uso de fertilizantes, que contienen Zn, en la agricultura, y las descargas de aguas residuales son las principales fuentes de contaminación y degradación de los cuerpos de agua (Palumbo-Roe, 2010; Ramani *et al.*, 2014). Los impactos de dicha contaminación se reflejan, por ejemplo, en la disminución de peces en los cuerpos de agua debido al incremento de los metales (Chen *et al.*, 2016), en la acumulación del Zn junto a otros metales en las plantas (Phaenark *et al.*, 2009; Yanqun *et al.*, 2004), en la contaminación de suelos y cultivos (Liu *et al.*, 2005) y en la salud de las personas (Wang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2012), todas ellas principalmente relacionadas al desarrollo de la actividad minera.

Los metales que conforman el GRUPO 2 están correlacionados con el factor 1 y relacionados principalmente con la conductividad eléctrica. Esto se debe a que estos metales, al encontrarse

disueltos en el agua, permiten conducir la corriente eléctrica. Estos metales son muy abundantes en la corteza terrestre y se encuentran principalmente en minerales, en formas de óxidos, carbonatos, fosfatos, entre otros (McDonough y Sun, 1995; Turekian y Hans, 1961; Yaroshevsky, 2006). Es posible que la presencia de la mayoría de estos metales en la cuenca se deba a la contribución tanto natural como antropogénico, relacionados a las características geológicas de la cuenca y a las actividades que se desarrollen en ella. Por ejemplo, el boro se encuentra en la corteza terrestre en forma natural en minerales de boratos (Kistler y Helvacı, 1994) y algunos de sus compuestos se utilizan como fertilizantes en la agricultura pues es esencial para el crecimiento de los cultivos, a pesar de que puede generar toxicidad en estos cultivos a concentraciones por encima de 0,5 ppm (FAO, 1985; Wyness, Parkman, y Neal, 2003; Bauder, Sutherland, y Davis, 2014). El bario se encuentra en la naturaleza en minerales como la barita (BaSO_4) y la whiterita (BaCO_3), su solubilidad es baja y, por ello, normalmente se encuentra en los cuerpos de agua en bajas concentraciones (Boyd, 2015). Sin embargo, se ha reportado la presencia de este compuesto en cuerpos de aguas superficiales debido a la extracción de sus minerales por actividades mineras (Pragst *et al.*, 2017).

Finalmente, se debe tener en cuenta que la cuenca del río Jequetepeque se encuentra en la franja de oro y cobre, y debido al desarrollo de la minería es posible que esta sea una de las principales fuentes que contribuyen en la presencia de los metales en el río.

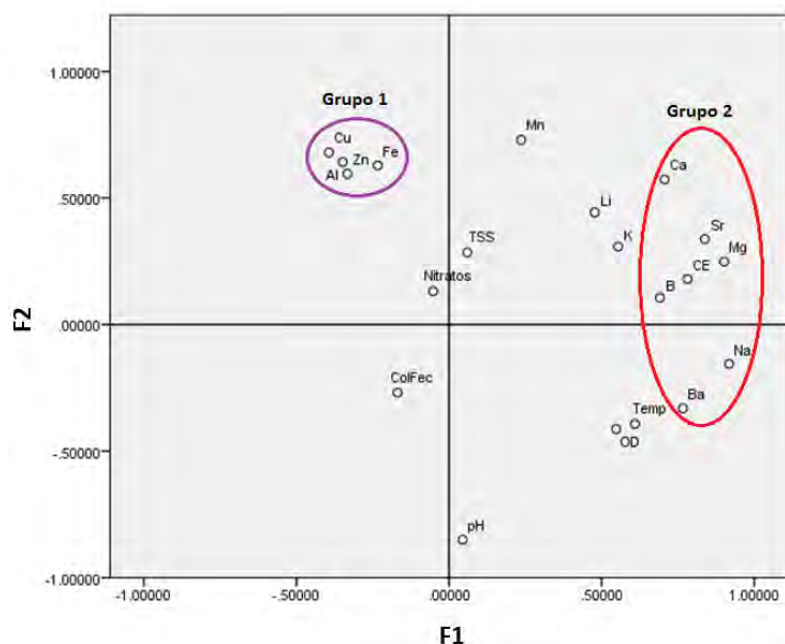


Figura 26. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2

En la figura 27 se observa las coordinaciones entre el factor 3 y el factor 4. En ella se aprecia que no existen grupos de varios parámetros pues cada factor está correlacionado con muy pocas variables que tengan una carga factorial significativa. Sin embargo, se puede observar que en el factor 3, el Fe y el TSS están agrupados y que los nitratos están correlacionados con el TSS negativamente. La agrupación entre el Fe y el TSS se puede deber a que los minerales que contienen este metal son depositados en los sedimentos del agua a partir de los procesos de meteorización y erosión de las rocas. La presencia este metal en el agua se debe principalmente a la disolución de sus minerales por acción de gas carbónico que acidifica el agua y facilita el proceso (Boyd, 2015; Manahan, 2010). La acidez de un cuerpo de agua puede aumentar debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona, como la minería (Moore, 2012; Boyd, 2015).

La correlación negativa del GRUPO 3 con los nitratos se puede deber, aparte de la formación natural de nitratos durante el ciclo del nitrógeno (Manahan, 2010), a la contribución de nitratos por el uso de fertilizantes que, a su vez, van a acumularse en los sólidos suspendidos. En caso de que exista menor cantidad de sólidos suspendidos, la retención de nitratos será menor y su concentración en agua se incrementará (Canatário, 2011; Kent y Landon, 2013). El factor 4 está principalmente determinado por el parámetro de coliformes relacionado a la actividad antropogénica (pecuaria y doméstica).

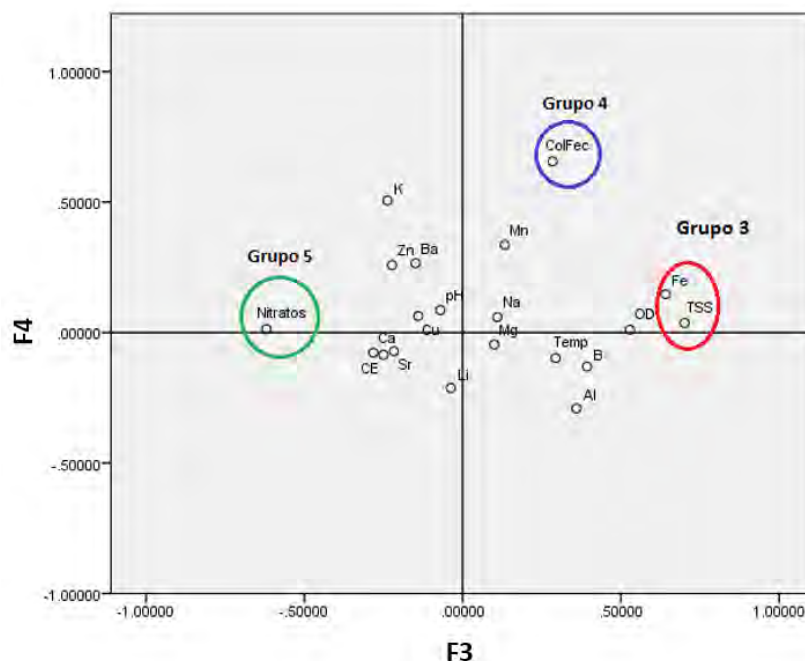


Figura 27. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4

En base a estos resultados obtenidos, entonces los factores pueden quedar definidos tal como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Definición de los factores obtenidos del AF

Factores	Definición
F1	Conductividad eléctrica
F2	Metales trazas
F3	Sólidos suspendidos
F4	Coliformes

Con el fin de determinar la distribución espacial de los parámetros en las estaciones de monitoreo, se grafica el promedio de las puntuaciones factoriales de las estaciones de monitoreo por cada factor y los valores autoescalados de cada factor seleccionado. Esto permite visualizar, de manera general, qué estaciones están influenciadas por los parámetros que predominan en cada factor. En la figura 28 se muestran las coordinaciones entre el promedio de las puntuaciones factoriales de las estaciones para los factores 1 y 2 y los valores autoescalados de cada factor sobre cada variable (parámetro). Se puede observar que el GRUPO 1 se encuentra más cerca de las estaciones RSmig, Ryana, RRejo, QShill y Rtint, las cuales se ubican en la parte alta de la cuenca. Ello evidencia que los parámetros del GRUPO 1 predominan sobre dichas estaciones, las cuáles se encuentran cerca de las zonas donde se realizan la actividad minera. Por lo tanto, es posible que las contribuciones de estos metales al río provengan de fuentes geológicas y antropogénicas; en cuanto a esta última principalmente relacionado a la actividad minera que se desarrolla en la parte alta de la cuenca. También se observa que las estaciones RRejo, Rtint, Ryana y RSmig se encuentran muy cercanas al parámetro de coliformes fecales. Esta distribución de este parámetro en estas zonas puede deberse a la actividad pecuaria, en donde el ganado se encuentra libre y contamina el río.

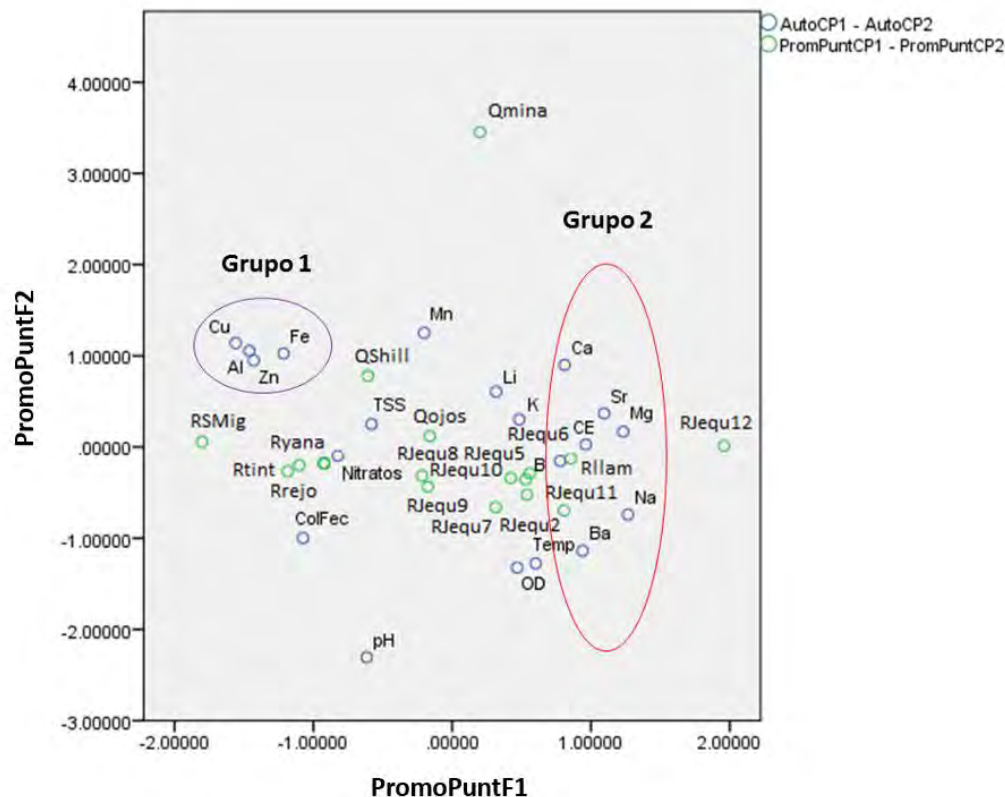


Figura 28. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1 y 2 de los parámetros

Los parámetros que conforman el GRUPO 2 se encuentran cercanos a las estaciones RJeju10, RJeju11, RJeju12, Rllam, RJeju9, RJeju8, RJeju5, RJeju6 y RJeju7. Esto indica que espacialmente la distribución de los parámetros que conforman el GRUPO 2 predomina en la parte media y baja de la cuenca. En la tabla 16 y la figura 23 se mostró que estas estaciones se encuentran distribuidas en la formación geológica depósitos fluviales recientes, constituidos principalmente por material sedimentario compuesto por elementos que incluyen los mencionados en el GRUPO 2. Adicionalmente, estas aguas reciben la contribución de la parte alta (doméstico, agrícola y minero) y de los contribuyentes cercanos donde se realiza agricultura intensiva. Por lo tanto, el origen del GRUPO 2 proviene de las contribuciones geológica y antropogénica. También se observa que la estación Qmina no se encuentra cerca a los GRUPOS que se correlacionan con ambos factores, lo que indica que no se relaciona con las demás estaciones de la red. Finalmente, no se realizan las coordinaciones de las puntuaciones de los factores 3 y 4 puesto que sus distribuciones también se visualizan en la figura 28. Su distribución prevalece principalmente en toda la cuenca y su origen es antropogénico principalmente.

Por otra parte, luego de aplicar la rotación Varimax se obtiene las cargas factoriales de los factores rotados, etiquetados como VF, los cuales se muestran en la tabla 22. La información mostrada en

la esta tabla se puede expresar a través de gráficas bidimensionales en las que se muestren las coordinaciones de las cargas entre los factores (VF).

Tabla 22. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para el periodo anual

Variables	VF1	VF2	VF3	VF4
OD	0,167	0,811	0,199	0,157
pH	-0,342	0,571	-0,499	0,209
Temp	0,274	0,739	0,005	0,027
CE	0,803	0,168	-0,180	-0,090
Nitratos	0,145	-0,410	-0,459	-0,071
TSS	0,042	0,149	0,741	0,065
ColFec	-0,302	0,115	0,117	0,703
Al	-0,084	-0,406	0,663	-0,368
B	0,556	0,482	0,339	-0,066
Ba	0,544	0,501	-0,354	0,341
Ca	0,930	-0,164	0,000	-0,149
Cu	0,013	-0,754	0,258	-0,078
Fe	-0,032	-0,289	0,888	0,098
K	0,690	-0,141	-0,087	0,459
Li	0,616	-0,049	0,160	-0,251
Mg	0,867	0,336	0,146	-0,020
Mn	0,531	-0,394	0,470	0,246
Na	0,694	0,613	-0,055	0,146
Sr	0,919	0,098	-0,075	-0,093
Zn	0,050	-0,739	0,139	0,122

En la figura A (anexos) se muestra las coordinaciones de las cargas entre el factor 1 y el factor 2, y se observa la formación de tres GRUPOS. En la figura B (anexos) se muestra las coordinaciones entre el factor 3 y el factor 4 y se aprecia la formación de dos grupos principalmente. La figura C (anexos) muestra la distribución de los grupos de parámetros que se correlacionan con el factor 1 y 2, en las estaciones de monitoreo. Los resultados y la información obtenida de los factores rotados son similares a los discutidos previamente del análisis factorial sin rotar.

Sobre la base de la información de las cargas factoriales de los parámetros de las tablas 20 y 22, la variable que posee menor carga es la variable nitratos, evidenciando que es la menos relacionada con los demás parámetros. Esto tiene sentido pues la mayoría de variables analizadas son metales, y los nitratos están relacionados principalmente con los parámetros orgánicos y con la actividad microbiana (Manahan, 2010). Sin embargo, esto no significa que no exista relación con los parámetros analizados en la red, pues algunas relaciones de este parámetro con algunos metales se han discutido en esta tesis.

6.2 Validación del análisis multivariado

Para validar el AF y el ACJ se ha optado por dividir la base de datos, tal como se menciona en la parte teórica. Esta división se ha realizado de manera estratégica con el fin de observar la influencia de la temporalidad en el análisis multivariado. De ahí que, el procedimiento consistió en dividir la muestra por periodos: avenida y estiaje. En el estudio realizado por la ANA se ha ejecutado el muestreo en cuatro temporadas, dos en temporada de avenida y dos en temporada de estiaje. En las tablas F y G (anexos) se muestran los datos para las temporadas de avenida y de estiaje de la base de datos.

6.2.1 Análisis de agrupamiento Jerárquico

Al igual que lo realizado para la base de datos anual, el ACJ a la base de datos por temporada se realizó a las estaciones de monitoreo. Los resultados finales se visualizan a través de figuras que muestren los dendogramas.

La figura 29 muestra los dendogramas obtenidos del ACJ de las estaciones considerando los datos en la temporada de avenida (O) y en la temporada de estiaje (P). En ella se observa la formación de tres grupos, GRUPO 1, GRUPO 2 y GRUPO 3. En ambas temporadas la agrupación es muy parecida. El GRUPO 1 en ambos casos (O y P) se encuentra conformado por las estaciones ubicadas en las partes media y baja de la cuenca, el GRUPO 2 esta conformado por las estaciones que se encuentran en la parte alta de la cuenca, y el GRUPO 3 esta conformado únicamente por la estación Qmina. También se observa que todas las agrupaciones pertenecientes al GRUPO 1, en ambos casos (O y P), poseen un alto grado de agrupamiento reflejando que las características asociadas a dichas estaciones poseen un alto grado de similitud.

En cuanto al GRUPO 2, se puede mencionar que existen ligeras diferencias en las temporadas (O y P). En el GRUPO 2, en temporada de avenida (O), se observa que el GRUPO-2-A posee un alto grado de agrupamiento y que los miembros del GRUPO-2-B se van integrando paulatinamente y cada vez a una mayor distancia, lo que evidencia que cada uno va perdiendo similitud con el GRUPO-2-A. En el GRUPO 2 de la temporada de estiaje (P) se observa que los miembros del GRUPO 2-A poseen un alto grado de agrupamiento y que consisten de cuatro estaciones, dos más que en el GRUPO 2-A de

la temporada de avenida (O). Esto puede deberse a que, en temporada de estiaje, las concentraciones de los parámetros analizados suelen incrementarse (Martínez-Soto *et al.*, 2016; Strady *et al.*, 2017) y, por lo tanto, estas estaciones pueden tener un mayor grado de similitud.

Finalmente, el GRUPO-3 de los periodos avenida y estiaje, está únicamente constituido por la estación Qmina. Esta estación posee la mayor distancia en el dendrograma, evidenciando su poca similitud con las estaciones de la red. Este resultado coincide con lo analizado durante el periodo anual. De esa manera, se valida el resultado del ACJ para las estaciones.



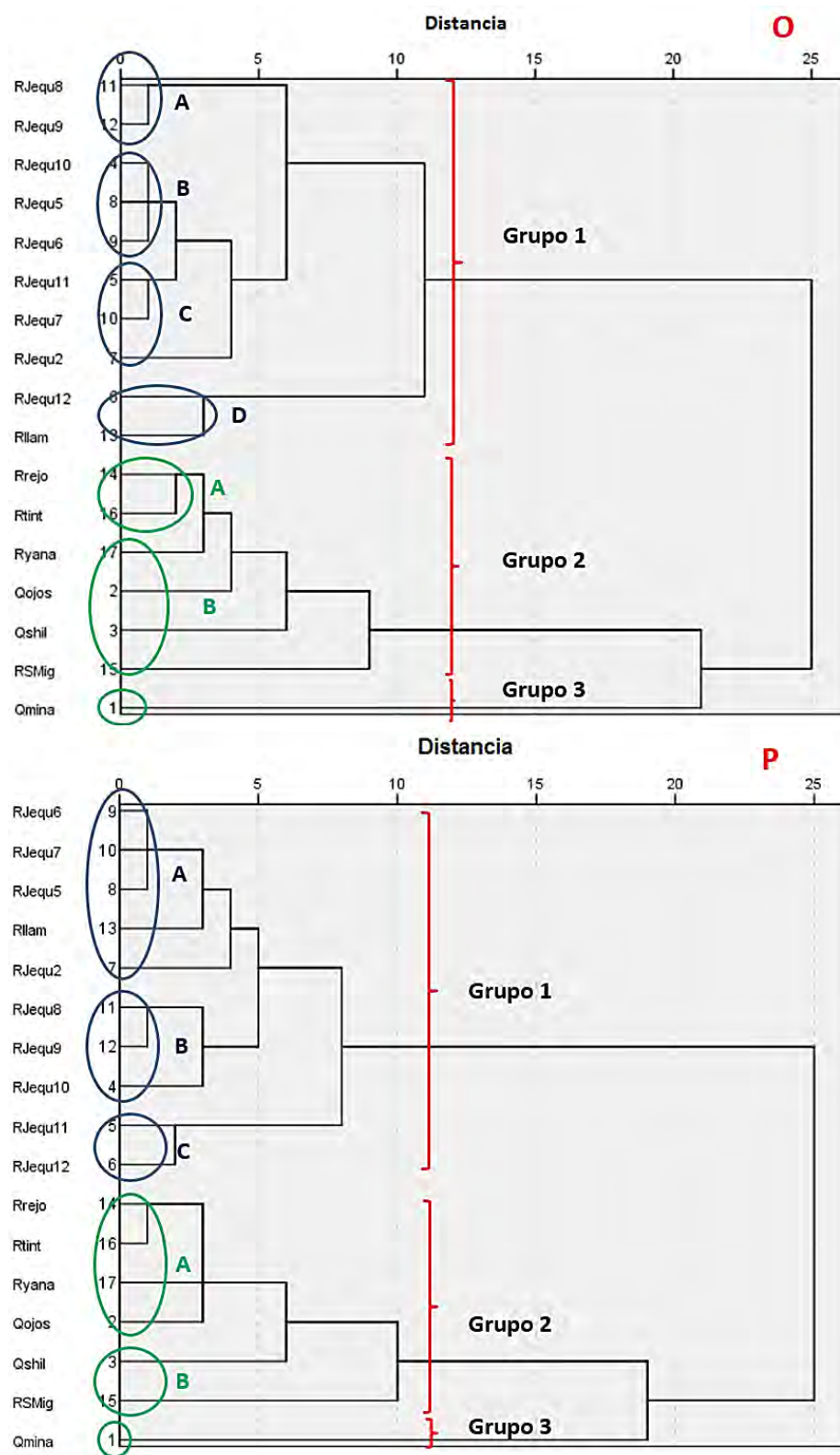


Figura 29. Dendrogramas de las estaciones en temporada de avenida (O) y en temporada de estiaje (P)

En las tablas 23 y 24 se muestran los perfiles de los grupos formados por el ACJ para ambas temporadas (avenida y estiaje) mostrados en la figura 29. Para ello se ha tomado el promedio de cada variable por cada grupo formado por el ACJ. En dicha tabla se puede observar que el GRUPO 1 de estaciones para ambas temporadas, los cuales están distribuidos en la parte baja de la cuenca, se encuentran principalmente influenciado por los parámetros que contribuyen principalmente a la salinización y que incrementan la conductividad eléctrica. El GRUPO 2 se encuentra principalmente influenciado por los parámetros metales trazas. Esta distribución se relaciona con las características geológicas y con las actividades antropogénicas que se desarrollan en la cuenca. También se observa que la estación Qmina posee valores que pueden ser considerados atípicos en relación a las demás estaciones de monitoreo que conforman el GRUPO 1 y GRUPO 2. Estas concentraciones pueden ser resultado de la contribución antropogénica, principalmente minera, puesto que esta estación se ubica en la zona donde se desarrolla la minería. Esto se refleja en los resultados de los valores promedios de pH, Al, Cu y Mn para el periodo de avenida y los valores promedios de pH, Cu, y Mn para el periodo de estiaje, los cuales exceden los ECA para la cagotografía 3 designada para la cuenca del río Jequetepeque. Estos resultados son similares a los obtenidos para el periodo anual, validando dichos resultados. Por lo tanto, se debe prestar particular atención a esta estación puesto que su particularidad se refleja en ambas temporadas al igual que para el periodo anual.

Tabla 23. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ para la temporada de avenida (O)

Parámetros	Grupo 1 (Parte baja)	Grupo 2 (Parte alta)	Qmina
OD	7,398	5,531	4,460
pH	8,196	8,138	5,180
Temp	25,224	14,654	14,545
CE	617,010	257,649	838,650
Nitratos	0,338	0,691	0,455
TSS	8,000	3,500	15,500
coliformes fecales	1108,290	2234,950	1,800
Al	0,275	0,347	5,765
B	0,137	0,014	0,117
Ba	0,048	0,030	0,020
Ca	65,999	36,856	287,300
Cu	0,002	0,007	0,548
Fe	0,131	0,226	1,723
K	11,789	1,567	2,140
Li	0,012	0,002	0,017
Mg	14,597	3,132	17,270
Mn	0,075	0,029	2,509

Na	427,731	5,389	6,865
Sr	0,457	0,209	0,755
Zn	0,009	0,019	0,270

Tabla 24. Perfiles de los tres grupos formados por el ACJ para la temporada de estiaje (P)

Parámetros	Grupo 1 (parte baja)	Grupo 2 (parte alta)	Qmina
OD	7,844	4,788	4,365
pH	8,374	7,944	4,955
Temp	24,578	12,659	14,460
Cond Elec	395,810	354,520	949,600
Nitratos	0,261	0,311	0,177
TSS	8,293	12,651	12,865
coliformes fecales	290,390	4511,850	40,500
Al	0,195	0,391	4,036
B	0,056	0,011	0,068
Ba	0,043	0,026	0,016
Ca	48,325	41,386	349,150
Cu	0,010	0,012	0,274
Fe	0,169	0,364	1,756
K	7,224	1,303	1,660
Li	0,004	0,002	0,029
Mg	9,070	2,835	19,760
Mn	0,034	0,048	1,194
Na	18,325	4,320	6,195
Sr	0,374	0,203	1,029
Zn	0,006	0,023	0,152

6.2.2 Análisis factorial

La validación del AF se realizó mediante el mismo procedimiento metodológico para la base de datos del periodo anual a los parámetros. Los resultados finales, al igual que los análisis previamente realizados, se visualizan a través de la matriz de factores y gráficos específicos para cada caso.

Al realizar el AF a la base de datos de la temporada de avenida se obtienen cuatro factores sin rotar que explican la mayor cantidad de varianza (75,71%), tal como se muestra en la tabla 25. Las cargas factoriales de estos factores de los parámetros analizados se muestran en la tabla 26. Esta

información se puede expresar en gráficas bidimensionales en las que se muestren las coordinaciones de las cargas factoriales entre los factores.

Tabla 25. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para la temporada de avenida

Factores	Total	% de varianza	% acumulado
1	6,622	33,110	33,110
2	3,966	19,831	52,941
3	2,872	14,358	67,299
4	1,682	8,410	75,709
5	,810	4,048	79,757
6	,724	3,619	83,377
7	,655	3,274	86,650
8	,547	2,735	89,385
9	,523	2,614	91,999
10	,390	1,950	93,949
11	,296	1,481	95,430
12	,235	1,177	96,607
13	,207	1,036	97,642
14	,181	,906	98,549
15	,105	,526	99,075
16	,075	,377	99,451
17	,045	,224	99,676
18	,033	,167	99,843
19	,018	,089	99,932
20	,014	,068	100,000

Tabla 26. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para la temporada de avenida

Parámetros	Factores			
	F1	F2	F3	F4
OD	0,499	-0,449	0,503	-0,003
pH	-0,155	-0,807	-0,215	0,153
Temp	0,555	-0,539	0,223	-0,012
CE	0,837	-0,061	-0,306	-0,114
Nitratos	-0,062	0,314	-0,622	-0,087
TSS	0,296	0,131	0,755	-0,010
ColFec	-0,081	-0,503	0,264	0,597
Al	-0,197	0,478	0,566	-0,514
B	0,819	0,081	0,318	0,037
Ba	0,727	-0,413	-0,278	0,096
Ca	0,810	0,426	-0,259	-0,108
Cu	-0,277	0,804	-0,216	0,120
Fe	0,057	0,457	0,787	0,170
K	0,483	0,339	-0,153	0,576
Li	0,599	0,303	-0,099	-0,415
Mg	0,936	0,086	-0,027	-0,060
Mn	0,530	0,544	0,208	0,327
Na	0,865	-0,327	0,064	-0,022
Sr	0,877	0,172	-0,278	-0,035
Zn	-0,023	0,602	-0,108	0,579

En la figura 30 se muestran las coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 y el factor 2, obtenidas para el periodo de avenida, y se observa la formación de dos grupos que correlacionan con esos factores. El GRUPO 1, que correlaciona con el factor 1, está compuesto por Ca, Sr, B, Mg, CE, Ba, Na y muy cerca se encuentra el Li. El factor 2 se correlaciona con el único parámetro que conforma el GRUPO 2, el Cu. A pesar de que solo el cobre posee una puntuación elevada para el componente 2, cerca se puede observar al Zn, Fe y Al. La agrupación de estos elementos, su origen y su relación inversa con el pH, coinciden con los resultados obtenidos para el periodo anual, validando dichos resultados.

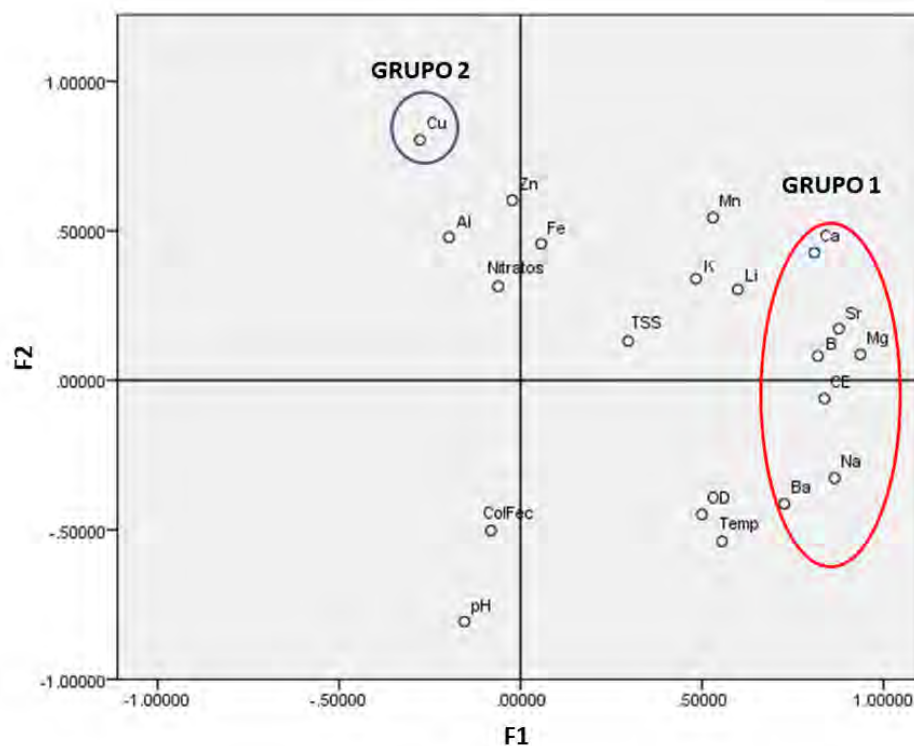


Figura 30. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 sin rotar para la temporada de avenida

En la figura 31 se muestran las coordinaciones entre el factor 3 y el factor 4. En ella se aprecia solo un grupo, el GRUPO 3, que predomina sobre el factor 3, el cual está correlacionado negativamente con los nitratos. Por otra parte, el componente 4 está principalmente determinado por los coliformes, aunque su carga factorial es baja.

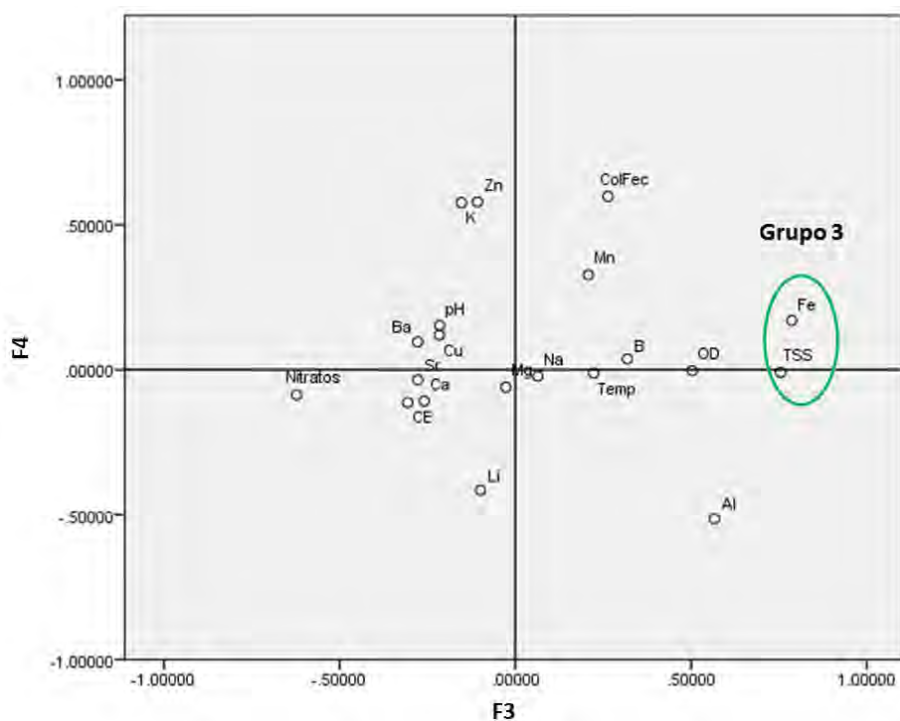


Figura 31. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4 sin rotar para la temporada de avenida

En base a estos resultados obtenidos para la temporada de avenida, los factores pueden quedar definidos tal como se muestra en la tabla 27. Esta definición coincide con lo observado para el periodo anual.

Tabla 27. Definición de los factores obtenidos del AF

Factores	Definición
F1	Conductividad eléctrica
F2	Metales trazas
F3	Sólidos suspendidos
F4	Coliformes

En la figura 32 se muestran las coordinaciones entre el promedio de las cargas factoriales de las estaciones para los factores 1 y 2, y los valores autoescalados de cada factor sobre cada variable (parámetro). En ella se puede observar a los dos grupos de variables que se correlacionan con

ambos factores discutidos en la figura 30. Se observa que el GRUPO 1 se encuentra más cerca de las estaciones que se ubican en la parte media y baja de la cuenca, RJequ12, RJequ10, RJequ11, Rllam, RJequ9, RJequ8, RJequ5, RJequ6 y RJequ7, mientras que el GRUPO 2, constituido por el Cu principalmente, que tiene cerca a los elementos Zn, Al y Fe, se encuentra distribuido cerca de las estaciones RSmig, Ryana, RRejo, QShill, Qojos y Rtint, ubicadas en la parte alta de la cuenca. Esto indica que la distribución en la parte alta está principalmente influenciada por la presencia de este tipo de metales. También se observa que estos metales se encuentran relacionados inversamente al pH, parámetro que también se encuentra cerca a estas estaciones. Ello indica que los cambios de pH predominan en la parte alta de la cuenca que influyen en los metales ya mencionados. Es probable que la variabilidad en el pH se deba a las actividades mineras que se desarrollan en la zona y que están relacionadas con la presencia de estos metales. Los parámetros que constituyen al GRUPO 1 se encuentran principalmente distribuidos en las partes media y baja de la cuenca. Este resultado es el mismo que el obtenido durante el periodo anual.

También se observa que la estación Qmina no se encuentra muy cerca a los grupos que se correlacionan con ambos factores, lo que indica que no se correlaciona con las demás estaciones en la red. El gráfico del promedio de las cargas factoriales de las estaciones y las puntuaciones de los parámetros de los factores 3 y 4, analizados para la temporada de avenida, no se realiza debido a que las puntuaciones son muy bajas en el componente 4. La información de ambos factores también está contenida en la figura 32 puesto que los sólidos suspendidos totales se encuentran distribuidos en toda la cuenca, tal como se ha observado en el análisis para los datos durante el periodo anual.

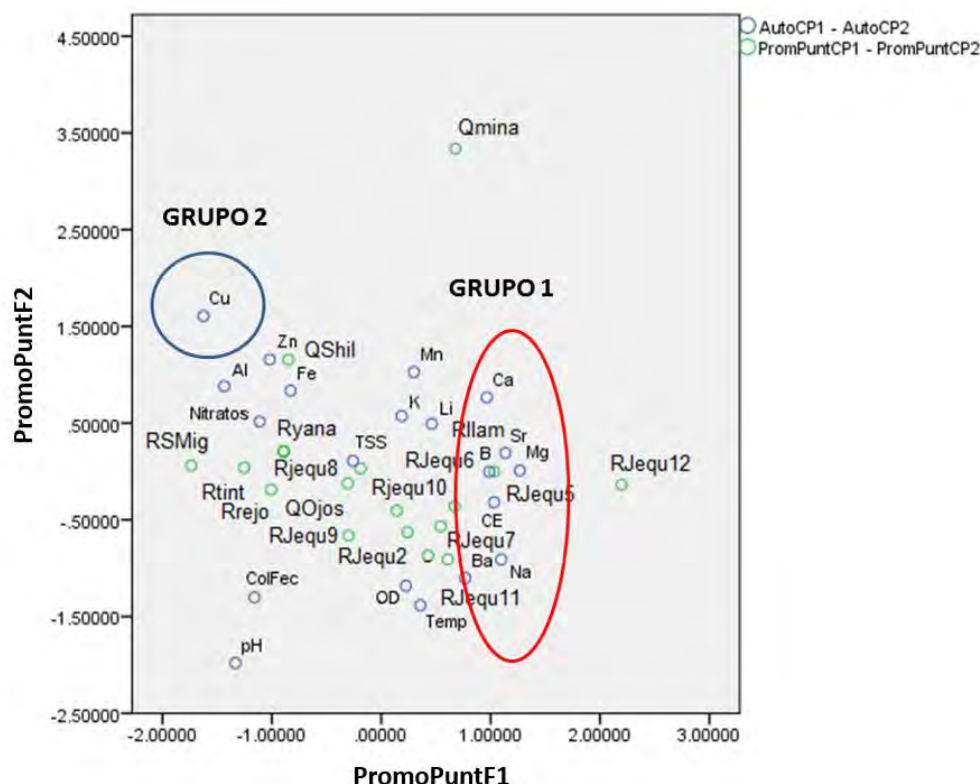


Figura 32. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1 y 2 de los parámetros para la temporada de avenida

Luego de realizar la rotación Varimax se obtienen los factores rotados (VF) que explican la mayor cantidad de varianza de cada variable por cada factor. Los VFs y las cargas factoriales de los parámetros analizados se muestran en la tabla 28. Esta información se puede expresar a través de gráficas bidimensionales de las coordinaciones de las cargas de los factores (VFs).

Tabla 28. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para la temporada de avenida

Variables	Factores			
	VF1	VF2	VF3	VF4
OD	0,278	0,779	0,088	-0,110
pH	-0,241	0,352	-0,697	-0,279
Temp	0,388	0,668	-0,164	-0,155
CE	0,869	0,092	-0,217	0,020
Nitratos	0,160	-0,647	-0,225	0,047
TSS	0,111	0,509	0,623	0,124

ColFec	-0,366	0,611	-0,323	0,272
Al	-0,119	-0,125	0,873	-0,244
B	0,680	0,443	0,264	0,228
Ba	0,657	0,347	-0,483	0,018
Ca	0,897	-0,191	0,110	0,249
Cu	-0,125	-0,710	0,292	0,424
Fe	-0,121	0,290	0,781	0,388
K	0,378	-0,006	-0,104	0,742
Li	0,728	-0,158	0,256	-0,109
Mg	0,899	0,229	0,053	0,160
Mn	0,427	0,056	0,365	0,639
Na	0,744	0,533	-0,146	-0,012
Sr	0,910	-0,003	-0,083	0,205
Zn	-0,066	-0,311	0,088	0,775

En la figura D (anexos) se muestra las coordinaciones de las cargas entre el factor 1 y el factor 2, y se aprecia la formación de tres GRUPOS. En la figura E (anexos) se muestran las coordinaciones entre el factor 3 y factor 4, y la formación de dos GRUPOS. En la figura F (anexos) se muestran los tres grupos que se correlacionan con los factores 1 y 2 distribuidos entre las estaciones de monitoreo. Los resultados y la información obtenida de los factores rotados son similares a los discutidos previamente del análisis factorial sin rotar.

Al realizar el AF a la base de datos para la temporada de estiaje se obtienen seis factores sin rotar que explican la mayor cantidad de varianza (85,11%), tal como se muestra en la tabla 29. Las cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros analizados se muestran en la tabla 30.

Tabla 29. Factores obtenidos del análisis de los parámetros como variables para la temporada de estiaje

Factores	Total	% de varianza	% acumulado
1	6,688	33,442	33,442
2	4,574	22,872	56,315
3	2,002	10,010	66,325
4	1,558	7,792	74,116
5	1,185	5,925	80,041
6	1,014	5,069	85,110

7	,754	3,769	88,879
8	,667	3,335	92,214
9	,429	2,144	94,359
10	,293	1,467	95,825
11	,242	1,208	97,033
12	,200	1,000	98,033
13	,116	,582	98,615
14	,078	,389	99,004
15	,065	,324	99,328
16	,054	,271	99,599
17	,035	,173	99,772
18	,025	,125	99,898
19	,016	,080	99,977
20	,005	,023	100,000

Tabla 30. Cargas factoriales de los factores sin rotar de los parámetros para la temporada de estiaje

Variables	Factores					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
OD	0,736	-0,356	0,355	0,013	0,286	-0,094
pH	0,307	-0,790	-0,072	0,279	0,039	-0,015
Temp	0,697	-0,237	0,317	-0,098	0,478	0,012
CE	0,577	0,458	-0,321	-0,098	0,027	-0,133
Nitratos	-0,085	0,013	-0,467	0,647	0,488	0,051
TSS	-0,226	0,198	0,713	0,492	0,227	-0,025
ColFec	-0,283	-0,217	0,359	0,318	-0,276	0,594
Al	-0,617	0,559	0,291	0,164	0,215	0,082
B	0,676	0,160	0,421	-0,475	-0,025	0,052
Ba	0,794	-0,129	-0,057	0,324	-0,223	-0,007
Ca	0,471	0,794	-0,239	0,110	0,031	0,174
Cu	-0,594	0,465	-0,059	-0,219	0,326	0,024
Fe	-0,604	0,547	0,463	0,068	-0,023	-0,260
K	0,555	0,462	-0,248	0,381	-0,080	-0,221
Li	0,204	0,614	0,096	0,202	-0,402	0,262
Mg	0,775	0,497	0,220	-0,117	0,106	0,174

Mn	-0,142	0,780	0,122	0,118	-0,172	-0,435
Na	0,946	0,109	0,185	0,103	0,042	0,016
Sr	0,676	0,620	-0,182	-0,091	0,123	0,256
Zn	-0,604	0,359	-0,262	-0,213	0,277	0,346

En la figura 33 se muestra las coordinaciones de las cargas factoriales entre el factor 1 y el factor 2, obtenidas para el periodo de estiaje, y se aprecia la formación de tres grupos que se correlacionan con esos factores. El GRUPO 1 y el GRUPO 3 se correlacionan con factor 1, y el factor 2 se correlaciona con el GRUPO 2. El agrupamiento, la composición y el origen de los metales que conforman los GRUPOS 1 y 3 se han observado y discutido anteriormente. Así, tenemos que el GRUPO 1 está definido como aquellos que contribuyen a la conductividad eléctrica, mientras que el GRUPO 3 está constituido por los metales traza. El agrupamiento del Mn y Ca, GRUPO 2, indica que el manganeso tiene el mismo comportamiento que el calcio en la cuenca. Es posible que dicho comportamiento se deba a la contribución antropogénica, minera principalmente. Finalmente, los gráficos de las cargas factoriales de los componentes 3, 4, 5 y 6 no se muestran debido a que las puntuaciones de la mayoría de las variables en estos factores son muy bajas.

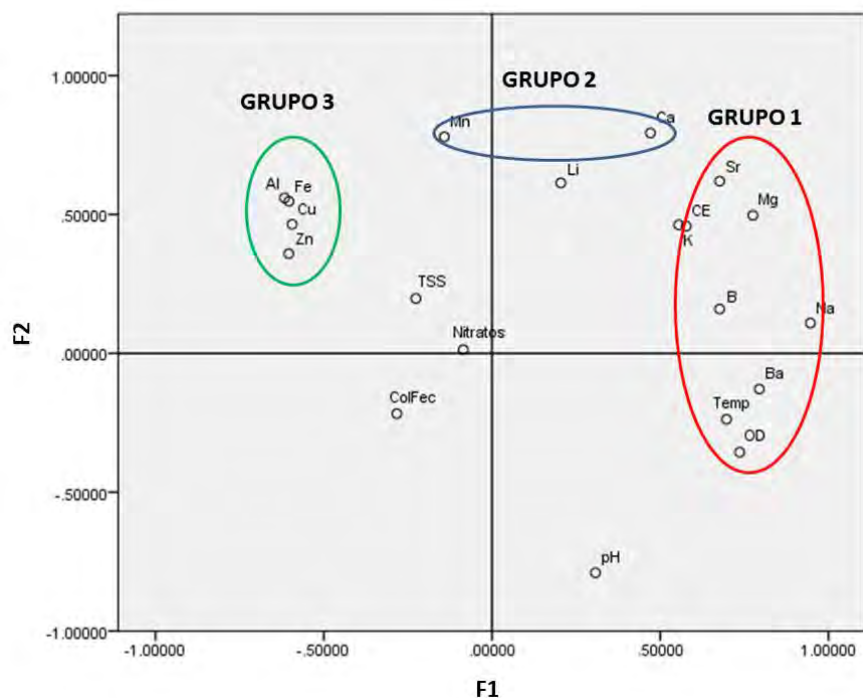
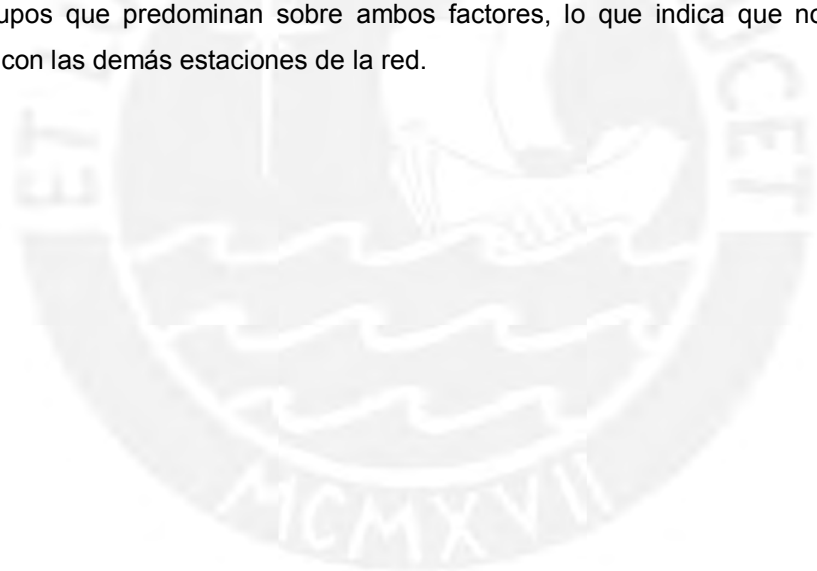


Figura 33. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 sin rotar para la temporada de estiaje

La figura 34 muestra las coordinaciones entre el promedio de las puntuaciones de las estaciones para los factores 1 y 2, y los valores autoescalados de cada factor sobre cada variable (parámetro), durante el periodo de estiaje. En ella se observa a los tres grupos de variables que se correlacionan con los factores discutidos en la figura 33.

El GRUPO 1 se encuentra cerca de las estaciones ubicadas en la parte media y baja de la cuenca RJequ12, RJequ10, RJequ11, Rllam, RJequ9, RJequ8, RJequ5, RJequ6 y RJequ7. Los parámetros que forman el GRUPO 2, y que predomina sobre el factor 2, son divididos por el factor 1. El Ca se encuentra principalmente distribuidos junto a los parámetros del GRUPO 1, mientras que el Mn se encuentra principalmente cerca de los parámetros que componen el GRUPO-3 - Al, Fe, Zn y Cu - distribuidos principalmente en las estaciones RSmig, Ryana, RRejo, QShill, Qojos y Rtint, en la parte alta de la cuenca. Esto evidencia que la parte alta de la cuenca está determinada por la presencia de estos metales, y que es posible que su origen sea principalmente influenciado por la actividad minera que se realiza en la zona. Estos metales se relacionan inversamente con el pH, parámetro que también se encuentra cerca de estas estaciones, efecto que ya ha sido discutido y observado durante el periodo de avenida. Finalmente, la estación Qmina no se encuentra muy cerca a los grupos que predominan sobre ambos factores, lo que indica que no se encuentra correlacionada con las demás estaciones de la red.



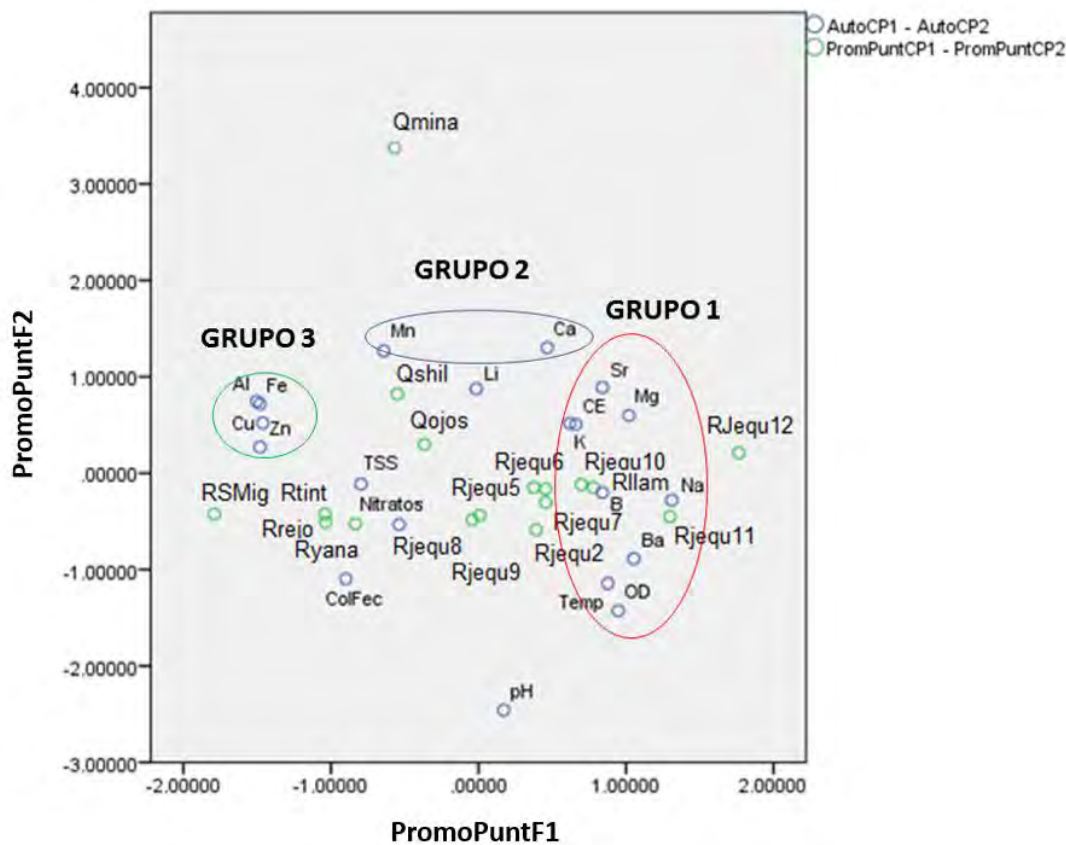


Figura 34. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores sin rotar 1y 2 de los parámetros para la temporada de estiaje

Al aplicar la rotación Varimax, considerando a los parámetros como variables en la temporada de estiaje, se obtienen los factores rotados (VFs) que explican la mayor cantidad de varianza. Las cargas factoriales de los parámetros se muestran en la tabla 31. La información de la tabla se puede expresar a través de gráficas bidimensionales en las que se muestren las coordinaciones de las cargas entre los factores (VFs).

Tabla 31. Cargas factoriales de los factores rotados de los parámetros para la temporada de estiaje

Variables	Factores					
	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5	VF6
OD	0,025	0,502	0,786	-0,093	-0,053	-0,061
pH	-0,383	0,592	0,250	-0,387	0,282	0,118
Temp	0,095	0,257	0,885	-0,123	-0,019	-0,082
CE	0,684	0,091	0,082	-0,142	-0,014	-0,414

Nitratos	0,084	-0,054	-0,023	-0,015	0,935	-0,026
TSS	-0,099	0,001	0,252	0,822	0,162	0,342
ColFec	-0,180	0,040	-0,113	0,092	-0,008	0,855
Al	0,030	-0,587	-0,154	0,665	0,123	0,176
B	0,383	0,144	0,570	-0,052	-0,624	-0,071
Ba	0,416	0,738	0,200	-0,207	0,070	0,036
Ca	0,958	-0,104	0,007	0,061	0,096	-0,105
Cu	-0,024	-0,778	-0,158	0,271	0,064	-0,134
Fe	-0,078	-0,378	-0,248	0,846	-0,156	-0,016
K	0,697	0,377	-0,052	0,125	0,241	-0,280
Li	0,684	0,065	-0,241	0,247	-0,165	0,285
Mg	0,785	0,102	0,513	0,047	-0,242	-0,026
Mn	0,398	-0,103	-0,340	0,683	-0,118	-0,333
Na	0,587	0,528	0,561	-0,064	-0,094	-0,049
Sr	0,923	-0,072	0,272	-0,145	-0,032	-0,105
Zn	0,019	-0,846	-0,237	-0,027	0,153	0,087

En la figura G (anexos) se muestran las coordinaciones de las cargas factoriales entre el factor 1 y el factor 2, y se aprecia la formación de tres GRUPOS. En la figura H (anexos) se muestra las coordinaciones del factor 3 y factor 4, y se aprecia la formación de dos GRUPOS. La gráfica de las coordinaciones de las cargas factoriales entre los factores 5 y 6 no se realizan debido a que el factor 5 está determinado únicamente por un solo parámetro, nitratos, mientras que el factor 6 está determinado por los coliformes. Ambos parámetros se encuentran relacionados a las actividades antropogénicas que se desarrollan en la cuenca (uso doméstico, industrial, agropecuario). En la figura I (anexos) se muestran los tres GRUPOS que se correlacionan con los factores 1 y 2 mostrados en la figura G (anexos), distribuidos en las estaciones de monitoreo. Los resultados y la información obtenida de los factores rotados son similares a los discutidos previamente del análisis factorial sin rotar.

En base a los resultados del análisis realizado para ambas temporadas y para el periodo anual, se obtuvo que el parámetro nitratos y la estación de monitoreo Qmina son los que poseen mayor distancia en el ACJ y menor carga factorial en el AF, evidenciando que ambos serían los menos relevantes para la red de acuerdo a la metodología reportada en la literatura (Noori *et al.*, 2010; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005). El parámetro nitratos representa el 5% de todos los parámetros analizados, indicando que el 95% de los parámetros analizados son representativos en

la red. De igual manera, la estación Qmina es la única estación menos representativa en la red, ello equivale al 5.88% de las estaciones, lo que significa que el 94.12% de las estaciones evaluadas son representativas estadísticamente de la red. Las estaciones finales de la red se muestran en la figura 35.

Sin embargo, en esta tesis se demuestra que el análisis multivariado permite principalmente determinar aquellas variables que poseen perfiles similares, y en ese sentido la estación Qmina y los parámetros nitratos deben ser considerados como diferentes, y no deben ser considerados como irrelevantes o menos importantes para la red tal como se reporta en la literatura (Noori *et al.*, 2010; Odayooth *et al.*, 2014; Ouyang, 2005). De esa manera, descartar la estación Qmina del conjunto de estaciones de la red de monitoreo de calidad de agua establecida en la cuenca resulta inadecuado, pues esta estación es una de las seis estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca que permiten determinar la influencia de la actividad minera sobre la calidad del agua del río, y además el perfil de estación en base a los valores de los parámetros de calidad de agua analizados incumplen con los ECA para el agua establecidos para la cuenca.

Además, teniendo en cuenta que los estudios realizados por Yacoub *et al.* (2013), Peña *et al.* (2015) y ANA (2015b) han determinado la influencia de las actividades antropogénicas, principalmente minería, y de las características geológicas en la calidad del recurso hídrico en la cuenca del río Jequetepeque, y que los principales conflictos socioambientales en el Perú están relacionados a la calidad del agua, vinculados principalmente a la actividad minera, resulta evidente mantener la estación Qmina como parte de la red de monitoreo establecida en la cuenca. De igual manera, descartar el parámetro nitratos del conjunto de parámetros monitoreados en la red también resulta inadecuado. Teniendo en cuenta que una de las principales fuentes de nitratos son los fertilizantes y que en la cuenca estos se utilizan de manera intensiva para el desarrollo de la actividad agrícola, y que se ha demostrado en estudios realizados por Vinelli (2012), Corcuera (2016), Ríos (2013) y Marchese (2015) la importancia de monitorear este parámetro pues las sales de nitratos que provienen del uso de los fertilizantes contribuyen a la salinización de los suelos y al deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, resulta importante mantener este parámetro en el monitoreo de calidad del agua en la cuenca.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta tesis evidencian que la red establecida en la cuenca resulta eficaz pues plasma las características esenciales de la calidad del agua en la cuenca, y que las guías internacionales utilizadas por la ANA resultan adecuadas para el diseño de los programas de monitoreos de calidad del agua que son establecidas en las cuencas del país, en particular en el diseño de las redes de monitoreo.



Figura 35. Estaciones significativas estadísticamente en la red de monitoreo de la cuenca del río Jequetepeque (Elaboración propia. Fuente: Sinia)

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Las técnicas de análisis multivariado, el análisis factorial y el análisis de clúster jerárquico, se aplicaron satisfactoriamente en el análisis de la eficacia de la red de monitoreo de calidad del agua de la cuenca del río Jequetepeque y resultan ser de gran utilidad para dicho propósito pues permite plasmar las características esenciales de la calidad del agua en la cuenca, las cuales se pueden resumir en dos grupos de estaciones de monitoreo, un grupo ubicado en la parte alta de la cuenca y otro grupo ubicado en la parte baja de la cuenca, y en cuatro grupos de parámetros, el grupo de metales trazas y el grupo de coliformes fecales distribuidos principalmente en la parte alta de la cuenca, otro grupo de parámetros vinculados a la salinización distribuidos en la parte baja de la cuenca, y los sólidos suspendidos distribuidos en toda la cuenca, lo que guarda relación con las características geológicas y antropogénicas que influyen en las variaciones de la calidad del recurso hídrico en la cuenca del río Jequetepeque. De esa manera, se abre una ventana hacia la posible implementación de la metodología en los programas de monitoreo de calidad del recurso hídrico del país. A su vez, se remarca la importancia y la necesidad de que la evaluación de las redes de monitoreo de calidad de los recursos hídricos sea reconocida y considerada en las políticas nacionales de GCRH, y así se garantice el correcto funcionamiento del mecanismo comando y control, el uso sostenible del recurso hídrico, el desarrollo de la GIRH, y el derecho humano al agua.

Se analizaron 17 estaciones de monitoreo y 20 parámetros de calidad de agua de la ANA en la cuenca del Jequetepeque a través del análisis multivariado. La estación Qmina y el parámetro nitratos resultaron ser los que menos se correlacionan con las demás variables en la red de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque. Sin embargo, el posible rediseño de la red que involucra el descarte de la estación Qmina y del parámetro nitratos de la red de monitoreo de calidad del agua de la cuenca de acuerdo a la metodología reportada en la literatura, resulta ser inadecuado. Pues queda demostrado que a través de la aplicación de las técnicas de análisis multivariado se identifican los grupos de variables (estaciones y parámetros) que poseen perfiles similares y aquellos que difieren de estos grupos deben ser considerados diferentes o atípicos. Esto se evidencia en los valores de los parámetros de calidad de agua de la estación Qmina, los cuales incumplen los ECA establecidos para la cuenca. Asimismo, monitorear el parámetro nitratos es de suma importancia pues se ha demostrado que contribuyen a la salinización de los suelos, y al deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea.

Se validaron las técnicas estadísticas multivariadas empleadas para la evaluación de la red de monitoreo de calidad del agua en la cuenca. Se validó el análisis factorial y el análisis de clúster

jerárquico mediante la división de la base de datos para luego ser analizadas mediante la misma metodología establecida en esta tesis.

La pregunta de investigación es resulta pues la eficacia de la red de monitoreo de la cuenca se puede analizar a través de las técnicas de análisis multivariado, agrupando y clasificando el número de estaciones de monitoreo y de parámetros de calidad de agua que caracterizan la calidad del recurso hídrico en la cuenca del río Jequetepeque. Sin embargo, la aplicación de las técnicas de análisis multivariado no resultan eficaces para discriminar el número de estaciones o parámetros de calidad del agua establecidos en la red.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar la evaluación de la red de monitoreo en base a sus tres aspectos: las estaciones de monitoreo, los parámetros de calidad del agua y las frecuencias de muestreo. En esta tesis se abordaron los dos primeros aspectos y solo en base a su eficacia, pues el tercero requiere de una base de datos que cuente con la información de varios años de monitoreo.

Se recomienda incrementar el número de estaciones de monitoreo alrededor de la estación Qmina, y en general en la parte alta de la cuenca, con la finalidad de obtener un mejor resultado del programa de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque, y así se permita evidenciar las posibles afectaciones por parte de la actividad minera en esta zona.

Se sugiere realizar la evaluación de la red de monitoreo de la cuenca utilizando otras técnicas estadísticas como el análisis de correlación-regresión, el concepto de entropía, el análisis determinante, el análisis de serie de tiempos y de intervalos de muestreo, de manera que, de obtener los mismos resultados, se obtiene el barrido estadístico completo y se contaría con una serie de herramientas a merced de los gestores involucrados en la GCRH.

Finalmente, es necesario contar con estaciones de monitoreo de calidad del agua en la cuenca que sirvan como blanco, pues de esa manera se puede analizar de manera eficaz las distribuciones espaciales y las variaciones temporales de los parámetros de calidad del agua, y así tener un mejor conocimiento de los procesos que influyen en la calidad del agua en la cuenca del río Jequetepeque.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo Nacional. (2002). Políticas de Estado. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <http://acuerdonacional.pe/politicas-de-estado-del-acuerdo-nacional/politicas-de-estado/politicas-de-estado-castellano/>
- Allaby, M. (2013). *Geology and Earth Sciences* (Third Edit). Oxford, England: Oxford University Press.
- ANA. (2010). Reglamento de la ley de Recursos Hídricos: Ley N°29338. *Autoridad Nacional del Agua*, 1-81. Recuperado a partir de http://www.iproga.org.pe/descarga/reglamento_29338.pdf
- ANA. (2013). Plan Nacional de los Recursos Hídricos. *Autoridad Nacional del Agua*.
- ANA. (2015a). Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Lima, Perú. Recuperado a partir de <http://www.minagri.gob.pe/portal/decreto-supremo/ds-2015/12601-decreto-supremo-n-006-2015-minagri>
- ANA. (2015b). Primer Monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2015c). Segundo Monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2016a). Estrategia Nacional Para El Mejoramiento De La Calidad De Los Recursos Hídricos. *Autoridad Nacional del Agua*.
- ANA. (2016b). Primer Monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2016c). Protocolo Nacional Para el Monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2016d). Reporte de Gestión 2011-2016: Principales logros a nivel nacional y regional. *Autoridad Nacional del Agua*.
- ANA. (2016e). Segundo Monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Jequetepeque. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- Asadollahfardi, G. (2015). *Water Quality Management Assessment and Interpretation*. Tehran: Springer.
- Banco Mundial. (2015). GDP ranking | Data. Recuperado 9 de octubre de 2016, a partir de <http://data.worldbank.org/data-catalog/GDP-ranking-table>
- Barnett, V. (2004). *Environmental Statistics (Methods and Applications)* (First Edit). Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Bauder, T. A., Sutherland, P. L., & Davis, J. G. (2014). *Irrigation Water Quality Criteria*. *Colorado State University Extension*.
- Beylot, A., & Villeneuve, J. (2017). Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 153, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.129>
- Biswas, A.K., Tortajada, C., Braga, B., Rodriguez, D. J. (Eds. . (2006). *Water quality management in the Americas*. *Water quality management in the Americas*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-30444-4>
- Borden, C., & Roy, D. (2015). *Water Quality Monitoring System Design*. Manitoba,

- Canadá: International Institute for Sustainable Development.
- Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1982). An Analysis of Transformations Revisited, Rebutted. *Journal of the American Statistical Association*, 77(377), 209. <https://doi.org/10.2307/2287791>
- Boyd, C. E. (2015). *Water Quality. UN--Water* (Segunda Ed). Auburn, AL, USA: Springer.
- Bui, T. K. L., Do-Hong, L. C., Dao, T. S., & Hoang, T. C. (2016). Copper toxicity and the influence of water quality of Dongnai River and Mekong River waters on copper bioavailability and toxicity to three tropical species. *Chemosphere*, 144, 872-878. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.058>
- Burton, M., Jasmine Zahedi, S., & White, B. (2012). Public preferences for timeliness and quality of mine site rehabilitation. The case of bauxite mining in Western Australia. *Resources Policy*, 37(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.01.004>
- Canatário, A. (2011). Water pollution induced by rainfed and irrigated agriculture in Mediterranean environment at basin scale. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 11(1-2), 35-46. <https://doi.org/10.2478/v10104-011-0034-3>
- Catena, A., Ramos, M., & Trujillo, H. (2003). *Análisis Multivariado: Un manual para investigadores* (Primera Ed). Madrid, España: Biblioteca Nueva.
- Chen, W. Y., Chen, T. Y., Hsieh, N. H., & Ju, Y. T. (2016). Site-specific water quality criteria for lethal/sublethal protection of freshwater fish exposed to zinc in southern Taiwan. *Chemosphere*, 159, 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.027>
- Chira, J., Gonzáles, R., Vargas, L., Rivera, R., Chero, D., & Guerra, K. (2007). *Prospección Geoquímica Regional en la Cuenca del Río Jequetepeque (Regiones Lambayeque y Cajamarca)*. Lima, Perú.
- Chunga, F. (2006). Cuenca social del Jequetepeque: Espacios socioterritoriales-administrativos en la gestión del agua. En S. Yáñez, N; Poats (Ed.), *Derechos de agua y gestión ciudadana: agua sustentable, visión social del agua en Los Andes* (pp. 204-227). International Development Research Center (IDRC).
- Coke, L., Weir, C., & Hill, V. (1987). Environmental Impact of Bauxite Mining and Processing in Jamaica. *Social and Economic Studies*, 36(1), 289-325.
- Congreso Constituyente del Perú. (1993). Constitución política del Perú.
- Constitución Política De Colombia. (2015). Constitución Política De Colombia de 1991 (actualizada al 2015).
- Constitución Política Del Estado Plurinacional de Bolivia. (2009). Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia. *Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia*.
- Corcuera, C. (2016). *ANÁLISIS DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DESTINADOS AL CULTIVO DE ARROZ EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO JEQUETEPEQUE*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Corrêa, C. T., & Ramírez, G. R. (2015). Impacto de la represa de Gallito Ciego en la estabilidad de línea de costa en la desembocadura del río Jequetepeque, Perú. *Espacio y Desarrollo*, 27, 79-101.
- Corte Constitucional de Colombia. (2008). Sentencia No T-760. *Sala Segunda de Revisión*.
- Davila, J. (1997). *Diccionario Geológico*. Lima, Perú. Recuperado a partir de <http://www.geoss.com.pe/docs/DICCIONARIO GEOLOGICO.pdf>
- Defensoría del Pueblo. (2015). Conflictos sociales y recursos hídricos, 151. Recuperado a partir de <http://www.defensoria.gob.pe/modules/Downloads/informes/varios/2015/I.A.->

Conflictos-por-Recursos-Hidricos.pdf

- DMA. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Directiva Marco del Agua de la Unión Europea*, (L 327), 1-72.
- Doornbos, B. (2008). La planificación hídrica: Un instrumento para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos. En P. Urteaga (Ed.), *Curso de formación en gestión integrada de los recursos hídricos. Módulo 1: «Gestión integrada de los recursos hídricos»* (pp. 100-109). Lima, Perú: Wageningen University, IHE-UNESCO, IPROGA.
- Druc, I., Inokuchi, K., & Shen, Z. (2013). Análisis de arcillas y material comparativo por medio de difracción de rayos x y petrografía para kuntur wasi, cajamarca, Perú. *Arqueología y Sociedad*, 26, 91-110.
- Einax, J., Zwanziger, H., & Geib, S. (1997). *Chemometrics in Environmental Analysis* (First Edit). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- EPA. (2013). Monitoring, Assessment and Reporting Guidelines. Recuperado 4 de junio de 2017, a partir de <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/repguid.html>
- Espejo, L., Kretschmer, N., Oyarzún, J., Meza, F., Núñez, J., Maturana, H., ... Oyarzún, R. (2012). Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5571-5588. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2363-5>
- FAO. (1985). Water quality for agriculture. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <http://www.fao.org/docrep/003/T0234E/T0234E05.htm#ch4.1.3>
- Francisco, P. (2015). Carta Encíclica Laudato Si': Sobre o cuidado da casa comum. Vaticano. *La Santa Sede*.
- García, L. (2006). Water Quality Issues in Latin America. En *Water quality management in the Americas* (pp. 1-14). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Gardner, J. H., & Bell, D. T. (2007). Bauxite mining restoration by Alcoa World Alumina Australia in Western Australia: Social, political, historical, and environmental contexts. *Restoration Ecology*, 15, 3-10. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00287.x>
- Girón, E. (2003). Andes Basin Profile: Jequetepeque River Basin. *Consortio para el Desarrollo sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN)*, 1-52.
- Giupponi, M. B. O., & Paz, M. C. (2015). The Implementation of the Human Right to Water in Argentina and Colombia. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional*, 15(1), 323-352. <https://doi.org/10.1016/j.amdi.2014.09.006>
- GNWT. (2017). Environment and Natural Resources. Recuperado 4 de junio de 2017, a partir de <http://www.enr.gov.nt.ca/en>
- Grenwood, N., & Earnshaw, A. (1999). *Chemistry of the Elements. Library* (Second Edi). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
- GRUFIDES. (2015). Conflicto Minero Lagunas Alto Perú. *Observatorio de conflictos cajamarca*.
- GWP. (2011). ¿Qué es la GIRH? Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <http://www.gwp.org/fr/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>
- Hair Jr, J. F., William, C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). *Multivariate Data Analysis* (Seventh Ed). London, United Kingdom: Pearson Education.
- Harmancioglu, N. B., Fistikoglu, O., Ozkul, S., Singh, V., & Alpaslan, N. (1999). *Water*

- Quality Monitoring Network Design. Hydrology and Water Resources of Africa* (1st Editio). Springer.
- Hassing, J., Ipsen, N., Jøneh-Clausen, T., Larsen, H., & Lindgaard-Jorgensen, P. (2009). Integrated Water Resources Management in Action. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 22.
- Hochmuth, J. D., Asselman, J., & De Schamphelaere, K. A. C. (2014). Are interactive effects of harmful algal blooms and copper pollution a concern for water quality management? *Water Research*, 60, 41-53.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.041>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydro-physical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Huang, X., Sillanpää, M., Gjessing, E. T., Peräniemi, S., & Vogt, R. D. (2010). Environmental impact of mining activities on the surface water quality in Tibet: Gyama valley. *Science of the Total Environment*, 408(19), 4177-4184.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.015>
- Hudson Institute of Minerlogy. (2017). Strunz Table. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <https://www.mindat.org/strunz.php?a=1&b=A>
- INEI. (2012). IV Censo Nacional Agropecuario 2012 - Cuadros Estadísticos. Recuperado 4 de junio de 2017, a partir de <http://censos.inei.gob.pe/cenagro/tabulados/>
- INEI. (2015). Población 2000 al 2015. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <http://proyectos.inei.gob.pe/web/poblacion/>
- INGEMMET. (2014). *ATLAS CATASTRAL MINERO Y GEOLÓGICO*.
- INRENA. (2004). ACTUALIZACION DEL PLAN DE ORDENAMIENTO AMBIENTAL DE LA CUENCA DEL RIO JEQUETEPEQUE PARA LA PROTECCION DEL RESERVORIO GALLITO CIEGO Y SU VALLE AGRÍCOLA. Lima, Perú: INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES.
- İşçen, C. F., Altın, A., Şenoğlu, B., & Yavuz, H. S. (2009). Evaluation of surface water quality characteristics by using multivariate statistical techniques: A case study of the Euphrates river basin, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151(1-4), 259-264. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0267-9>
- Jahnsen, M. (2013). *Impacto De La Represa Gallito Ciego En La Pérdida De Tierras De Cultivo Por Salinización En La Cuenca Baja Del Río Jequetepeque 1980-2003*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Kannel, P., Lee, S., Kanel, S., & Khan, S. (2007). Chemometric application in classification and assessment of monitoring locations of an urban river system. *Analytica Chimica Acta*, 582(2), 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.006>
- Kent, R., & Landon, M. K. (2013). Trends in concentrations of nitrate and total dissolved solids in public supply wells of the Bunker Hill, Lytle, Rialto, and Colton groundwater subbasins, San Bernardino County, California: Influence of legacy land use. *Science of the Total Environment*, 452-453, 125-136.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.042>
- Khalil, B., & Adamowski, J. (2013). Towards a Consistent Approach for the Assessment and Redesign of Surface Water Quality Monitoring Networks. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 2(1), 2-4. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000e113>
- Khalil, B., Ou, C., Proulx-McInnis, S., St-Hilaire, A., & Zanacic, E. (2014). Statistical Assessment of the Surface Water Quality Monitoring Network in Saskatchewan.

- Water, Air, & Soil Pollution*, 225(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2128-1>
- Kim, S. E., Seo, I. W., & Choi, S. Y. (2017). Assessment of water quality variation of a monitoring network using exploratory factor analysis and empirical orthogonal function. *Environmental Modelling & Software*, 94, 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.035>
- Kistler, R. B., & Helvacı, C. (1994). Boron and Borates. *Industrial Minerals and Rocks*, 6, 171-186.
- Kostas, V., & Dimitra, V. (2012). *WATER QUALITY MONITORING AND ASSESSMENT*. (T. Smiljanic, Ed.) (First Edit). Rijeka, Croati: InTech.
- LE BAS, M. J., & STRECKEISEN, A. L. (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148(5), 825-833. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.148.5.0825>
- Ley De Recursos Hídricos. (2009). Ley De Recursos Hídricos del Perú N° 29338, 37.
- Ley Orgánica de los Recursos Hídricos de Ecuador. (2014). Ley Orgánica De Recursos Hídricos, Usos Y Aprovechamiento Del Agua.
- Liu, H., Probst, A., & Liao, B. (2005). Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Science of the Total Environment*, 339(1-3), 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.030>
- Manahan, S. (2011). *Water Chemistry: Green Science and Technology of Nature's Most Renewable Resource* (1st editio). Boca Ratón: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Marchese, A. (2015). *Estudio físico y químico de suelos agrícolas para la estimación del nivel de salinización en el sector bajo de San Pedro de Lloc*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Martínez-Soto, M. C., Tovar-Sánchez, A., Sánchez-Quiles, D., Rodellas, V., Garcia-Orellana, J., & Basterretxea, G. (2016). Seasonal variation and sources of dissolved trace metals in Maó Harbour, Minorca Island. *Science of the Total Environment*, 565, 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.244>
- Matienzo, R. (2014). *Análisis de la influencia de la represa de Gallito Ciego en la calidad del agua del curso inferior del río Jequetepeque*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- McDonough, W. F., & Sun, S. s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mendoza, N. (2005). *Modelo geológico del proyecto aurífero tipo 'High sulfidation' de Arnacocha" distrito minero de Yanacocha-Cajamarca*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- MINAGRI. (2013). Monitoreo de calidad de aguas del río Jequetepeque. Ministerio de Agricultura y Riego.
- MINAM. (2005). Ley General del Ambiente - Ley N° 28611. *Ministerio del Ambiente*. Recuperado a partir de <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/leygeneralambiente2.pdf>
- MINAM. (2009). Política Nacional del Ambiente. *Ministerio del Ambiente, Decreto Su*, 1-48. Recuperado a partir de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/08/Política-Nacional-del-Ambiente.pdf>
- MINAM. (2015). Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. *Ministerio del Ambiente*, (Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM). Recuperado a partir de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-Nº-015-2015-MINAM.pdf>

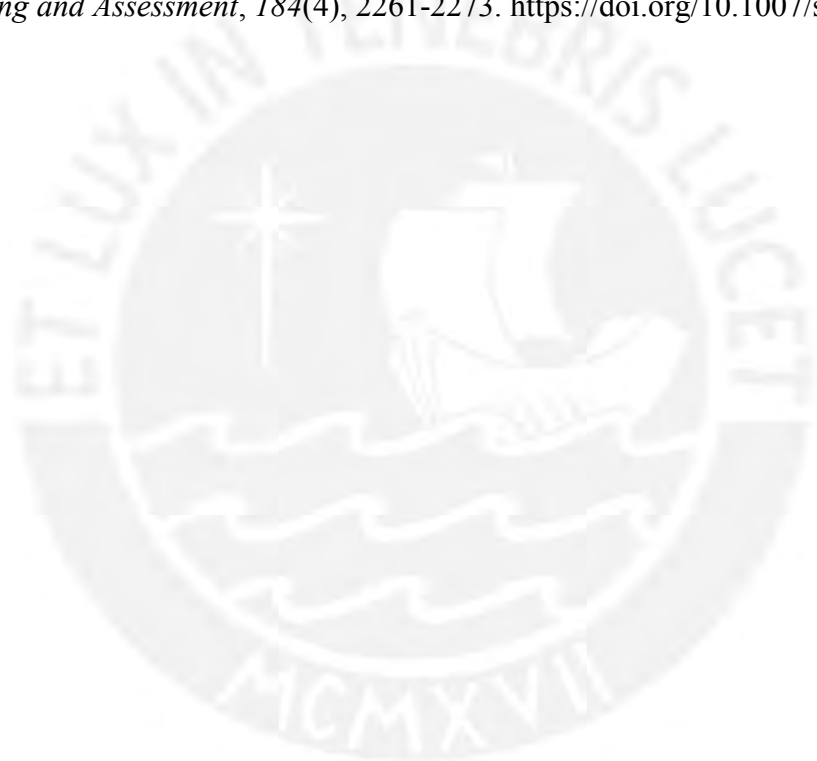
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.
- Miyashiro, V., Méndez, L., & Orihuela, L. (2014). *Gestión del Agua en el Perú: Uso, protección y tratamiento*. Universidad Nacional Agraria La Molina (Primera Ed). Lima, Perú: UNALM.
- Moore, J. (1990). *Inorganic Contaminants of Surface Water: Research and Monitoring Priorities* (1st editio). Alberta, Canadá: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-71425-7>
- Noori, R., Sabahi, M. S., Karbassi, A. R., Baghvand, A., & Zadeh, H. T. (2010). Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set. *Desalination*, 260(1-3), 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.053>
- Odayooth, M., Karmakar, S., & Harikumar, P. S. (2014). Assessment and rationalization of water quality monitoring network: A multivariate statistical approach to the Kabbini River (India). *Environmental Science and Pollution Research*, 21(17), 10045-10066. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3000-y>
- Ofungwu, J. (2014). *Statistical Applications for Environmental Analysis and Risk Assessment*. (V. Barnett, Ed.) (First edit). New Jersey, USA: Wiley.
- OMS. (2016). WHO | Drinking-water. *WHO*. Recuperado a partir de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/en/>
- OMS. (2017). Esquistosomiasis. Recuperado 4 de junio de 2017, a partir de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs115/es/>
- ONERN. (1986). Plan de Ordenamiento Ambiental de la Cuenca del Río Jequetepeque para la Protección del Reservorio Gallito Ciego y del Valle Agrícola. *OFICINA NACIONAL DE EVALUACION DE RECURSOS NATURALES*.
- ONU. (1948). Declaración Universal DD.HH. *Organización de las Naciones Unidas*, (Resolución 217 A (III)). Recuperado a partir de http://www.ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR_Translations/spn.pdf
- ONU. (2010). El derecho humano al agua y al saneamiento. *Organización de las Naciones Unidas*, (A/RES/64/292). Recuperado a partir de http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S
- ONU. (2013). Observación general N° 15 (2013) sobre el derecho del niño al disfrute del más alto nivel posible de salud (artículo 24). *Organización de las Naciones Unidas*, (CRC/C/GC/15). Recuperado a partir de http://www.codajic.org/sites/www.codajic.org/files/Convención sobre los Derechos del Niño .GC_.15_sp_0.pdf
- ONU. (2015). Human right to safe drinking water and sanitation. *Organización de las Naciones Unidas*, (A/70/203). Recuperado a partir de <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/231/39/PDF/N1523139.pdf?OpenElement>
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024>
- Palumbo-Roe, B. (2010). Zinc : the invisible threat, 72-73. Recuperado a partir de <http://www.bgs.ac.uk/downloads/browse.cfm?sec=3&cat=164>
- PEJEZA. (2013). *Proceso de sedimentación del embalse Gallito Ciego y plan de acción para la seguridad y evacuación de sedimentos*.
- Peña, F., Carpio, J., & Vargas, V. (2015). *Hidrogeología de la cuenca de los ríos*

- Jequetepeque (13774) y Chamán (137752). Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque. Boletín, Serie H: Hidrogeología. Lima, Perú.*
- Pereyra, C. (2009). Causas y tendencias de los conflictos por el agua en el Perú. En P. Urteaga (Ed.), *Conflictos por el agua en la Región Andina: Avances de Investigación y Herramientas de Manejo* (pp. 43-60). Lima: Concertación-IPROGA.
- Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2003). *Natural resource and environmental economics* (Third Edit). London: Pearson Education.
- Phaenark, C., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., & Ngernsarsaruay, C. (2009). Cd AND Zn ACCUMULATION IN PLANTS FROM THE PADAENG ZINC MINE AREA. *International Journal of Phytoremediation*, 11(5), 479-495. <https://doi.org/10.1080/15226510802656243>
- Pharino, C. (2007). *Sustainable Water Quality Management Policy: The rol of Trading*. (J. Kauffman, Ed.), *ALLIANCE FOR GLOBAL SUSTAINABILITY BOOKSERIES SCIENCE AND TECHNOLOGY: TOOLS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT* (First Edit, Vol. 10). Cambridge, MA, U.S.A: Springer.
- Pinto, M. (2015). Medios de protección y jurisprudencia sobre el contenido del derecho humano al agua y saneamiento. En P. Urteaga & Á. Verona (Eds.), *Cinco años de la Ley de Recursos Hídricos en el Perú: Segundas Jornadas de derecho de Aguas* (Primera Ed, pp. 27-45). Lima, Perú: Centro de Investigación, Capacitación y Asesoría Jurídica del Departamento Académico de Derecho (CICAJ-DAD) PUCP.
- Pochat, V. (2008). Principios de gestión integrada de los recursos hídricos: Bases para el desarrollo de planes nacionales. *Global Water Partnership–GWP*, 12.
- Porto, M., & Lobato, F. (2004a). Mechanisms of Water Management : Command & Control and Social Mechanisms. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, (1), 113-129.
- Porto, M., & Lobato, F. (2004b). Mechanisms of Water Management : Economics Instruments and Voluntary Adherence Mechanisms. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, (2), 131-146.
- Pragst, F., Stieglitz, K., Runge, H., Runow, K. D., Quig, D., Osborne, R., ... Ariki, J. (2017). High concentrations of lead and barium in hair of the rural population caused by water pollution in the Thar Jath oilfields in South Sudan. *Forensic Science International*, 274, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.12.022>
- Preciado, R., & Álvarez, C. (2016). *Gobernanza del agua en zonas mineras del Perú: abriendo el diálogo* (1st editio). Lima: CooperAcción.
- Pyatt, F. B., Gilmore, G., Grattan, J. P., Hunt, C. O., & McLaren, S. (2000). An Imperial Legacy? An Exploration of the Environmental Impact of Ancient Metal Mining and Smelting in Southern Jordan. *Journal of Archaeological Science*, 27(9), 771-778. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0580>
- Quispe, E. (2008). *Diseño de un programa de monitoreo de agua superficial en San Pedro de Lloc*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ramani, S., Dragun, Z., Kapetanović, D., Kostov, V., Jordanova, M., Erk, M., & Hajrulai-Musliu, Z. (2014). Surface water characterization of three rivers in the lead/zinc mining region of northeastern Macedonia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 66(4), 514-528. <https://doi.org/10.1007/s00244-014-0012-z>
- Red-DESC. (2002). Observación general N° 15: El derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales). Recuperado 4 de junio de 2017, a partir de <https://www.escr-net.org/es/recursos/observacion-general->

- no-15-derecho-al-agua-articulos-11-y-12-del-pacto-internacional
Reglamento de la Ley de Aguas del Estado Boliviano. (1906). LEY DE AGUAS VIGENTE (Elevado al rango de ley el 28 de noviembre de 1906).
- Ríos, N. (2013). *Estudio químico de sedimentos de la represa de Gallito Ciego como contribución al estudio de calidad ambiental del reservorio*. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
- Rosas, M. (2016). *Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú y los costos ambientales asociados*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Salmón, E. (2014). El derecho al agua en el derecho internacional de los derechos humanos. En A. Guevara Gil & Á. Verona (Eds.), *El derecho frente a la crisis del agua en el Perú: Primeras jornadas de derecho de aguas* (Primera Ed, pp. 319-341). Lima, Perú: Centro de Investigación, Capacitación y Asesoría Jurídica del Departamento Académico de Derecho (CICAJ-DAD) PUCP.
- Schuenemeyer, J. H., & Drew, L. J. (2011). *Statistics for Earth and Environmental Scientists* (First Edit). New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9780470650707>
- Sebastian, T., Nath, B. N., Naik, S., Borole, D. V., Pierre, S., & Yazing, A. K. (2017). Offshore sediments record the history of onshore iron ore mining in Goa State, India. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), 805-815.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.075>
- Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques : A case study of the Fuji river basin , Japan, 22, 464-475.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
- Strady, E., Dinh, Q. T., Nemery, J., Nguyen, T. N., Guédron, S., Nguyen, N. S., ... Nguyen, P. D. (2017). Spatial variation and risk assessment of trace metals in water and sediment of the Mekong Delta. *Chemosphere*, 179, 367-378.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.105>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63)
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
<https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- Sun, M. C. Y., Doong, R., Wu, S., & Fu, C. (2007). Concentrations and Correlations of Trace Metals in Estuarine Sediments - Interpretation By Multivariate Statistical Analysis and Elemental Normalization. *Environmental Engineering*, 17(2), 143-150.
- Sundaray, S. K., Panda, U. C., Nayak, B. B., & Bhatta, D. (2006). Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi river-estuarine system (India) - A case study. *Environmental Geochemistry and Health*, 28(4), 317-330. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9001-5>
- The Water Project. (2016). Facts and Statistics about Water and Its Effects. Recuperado 3 de junio de 2017, a partir de https://thewaterproject.org/water-scarcity/water_stats
- Turekian, K. K., & Hans, K. (1961). Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175-192.
- UHCHR, & WHO. (2010). The Right to Water, Fact Sheet No. 35. *Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights, World Health Organization*, 56.
- UN-Water. (2011). Water quality. *Policy Brief*, 22.

- UN-Water. (2015). *Water for a sustainable world*. Paris: UNESCO.
[https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(02\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(02)00004-1)
- UNEP. (2012). *The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management*.
- US Census Bureau. (2016). International Programs, World Population. Recuperado 3 de junio de 2017, a partir de
https://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table_population.php
- Useche, L., & Mesa, D. (2006). Una introducción a la imputación de valores perdidos. *Red de revistas científicas de América Latina, el caribe, España y Portugal*, XXII(31), 127-151.
- USGS. (2015). Zinc. *Mineral Commodity Summaries*, (703), 186.
- Van der Zaag, P. (2008). Introducción a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. En P. Urteaga (Ed.), *Curso de formación en gestión integrada de los recursos hídricos. Módulo 1: «Gestión integrada de los recursos hídricos»* (p. 18). Lima: Wageningen University, IHE-UNESCO, IPROGA.
- Véliz, C. (2016). *Análisis multivariante: métodos estadísticos multivariantes para la investigación* (1st editio). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Cengage Learning Argentina.
- Vinelli, R. (2012). *Estudio analítico de nitratos en aguas subterráneas en el distrito de San Pedro de Lloc*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Vuori, K.-M. (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*. <https://doi.org/0003-445X>
- Walter, K., Gunkel, G., & Gamboa, N. (2012). An assessment of sediment reuse for sediment management of Gallito Ciego Reservoir, Peru. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 17(4), 301-314. <https://doi.org/10.1111/lre.12008>
- Wang, Y., Wang, R., Fan, L., Chen, T., Bai, Y., Yu, Q., & Liu, Y. (2017). Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China. *Chemosphere*, 174, 613-627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.055>
- Watling, H. R., Shiers, D. W., Li, J., Chapman, N. M., & Douglas, G. B. (2014). Effect of water quality on the leaching of a low-grade copper sulfide ore. *Minerals Engineering*, 58, 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.005>
- World Economic Forum. (2017). *The Global Risks Report 2017 12th Edition. Insight Report* (12th ed.). Switzerland: World Economic Forum.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wu, Z. L., Zou, L. C., Chen, J. H., Lai, X. K., & Zhu, Y. G. (2016). Column bioleaching characteristic of copper and iron from Zijinshan sulfide ores by acid mine drainage. *International Journal of Mineral Processing*, 149, 18-24.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.015>
- Wyness, A. J., Parkman, R. H., & Neal, C. (2003). A summary of boron surface water quality data throughout the European Union. *Science of the Total Environment*, 314-316(3), 255-269. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00106-2)
- Xu, R. kou, Zhao, A. zhen, Yuan, J. hua, & Jiang, J. (2012). pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *Journal of Soils and Sediments*, 12(4), 494-502.
<https://doi.org/10.1007/s11368-012-0483-3>
- Yacoub, C. (2013). *Developing tools to evaluate the environmental status of Andean basins*

- with mining activities*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Yacoub, C., Pérez-Foguet, A., Blazquez, N., & Miralles, N. (2013). Spatial and temporal trace metal distribution of a Peruvian basin : recognizing trace metal sources and assessing the potential risk, *185*(10), 7961-7978. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3147-x>
- Yanqun, Z., Yuan, L., Schwartz, C., Langlade, L., & Fan, L. (2004). Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China. *Environment International*, *30*(4), 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.10.012>
- Yaroshevsky, A. A. (2006). Abundances of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry International*, *44*(1), 48-55. <https://doi.org/10.1134/S001670290601006X>
- Zhang, X., Yang, L., Li, Y., Li, H., Wang, W., & Ye, B. (2012). Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184*(4), 2261-2273. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2115-6>



9 ANEXOS

Tabla A. Estaciones monitoreadas en el estudio de la ANA

2015-1			2015-2			2016-1			2016-2		
Estación	Coordenadas UTM		Estación	Coordenadas UTM		Estación	Coordenadas UTM		Estación	Coordenadas UTM	
	ESTE	NORTE		ESTE	NORTE		ESTE	NORTE		ESTE	NORTE
Yana1	743813	9228206	RYana1	743813	9228206	Ryana	750084	9238587	Ryana	750084	9238587
Qmina1	746654	9233990	Qmina	746654	9233990	Ryana1	743813	9228205	Qojos1	747905	9235117
Qojos	747905	9235117	Qojos1	747905	9235117	Qojos	747905	9235117	QMina1	746654	9233990
Qshil	768792	9227205	Ryana	750084	9238587	Qmina	746630	9233995	RYana1	743813	9228206
RJequ2	767779	9193491	Qshill	768792	9227205	Rtint	761729	9222264	Qshill	768792	9227205
RTin1	762492	9224375	RJequ2	767779	9193491	RJequ1	791376	9187886	Rtint1	762492	9224375
Rrejo	750025	9224128	Rtint	762492	9224375	Rrejo	760577	9221948	RRejo1	750025	9224128
RSMig1	736830	9221687	RRejo	750025	9224128	Qshil	768801	9227202	RSmig1	736830	9221687
RIlam1	740879	9206578	RSmig1	736830	9221687	RSMig	736730	9223015	RJequ2	767779	9193491
RJequ5	729639	9202482	QLlam1	740879	9206578	Rcont	738562	9187552	QLlam1	740879	9206578
RJequ6	709710	9197515	Rcont	738559	9187520	RIlam1	740444	9207760	RJequ5	729639	9202482
RCont	738559	9187520	RJequ5	729639	9202482	RJequ2	767787	9193490	RJequ6	709710	9197515
RJequ7	706152	9197374	RJequ6	709710	9197515	RIlam2	739924	9204053	RJequ7	706152	9197374
RJequ8	696719	9198807	RJequ7	706152	9197374	Rjequ5	729963	9202404	RJequ8	696719	9198807
RJequ9	691211	9195378	RJequ8	696719	9198807	RJequ6	709705	9197512	RJequ9	691211	9195378
RJequ10	681070	9190013	RJequ9	691211	9195378	Rjequ7	706360	9197306	RJequ10	681070	9190013
RJequ11	667676	9190128	RJequ10	681070	9190013	Rjequ8	696724	9199035	RJequ11	667676	9190128
RJequ12	655813	9189084	RJequ11	667676	9190128	Rjequ9	696724	9199035	RJequ12	655813	9189084
			RJequ12	655813	9189084	Rjequ10	679883	9190144			
						Rjequ11	668569	9190056			
						Rjequ12	655802	9189208			

Tabla B. Parámetros analizados en el estudio realizado por la ANA

Parámetros	Unidades	Parámetros	Unidades
Potencial hidrogeno	Unidad de pH	Calcio	mg/L
Temperatura	°C	Cerio	mg/L
Oxígeno disuelto	mg/L	Cromo	mg/L
Conductividad eléctrica	µS/cm	Cobalto	mg/L
Cianuro WAD	mg/L	Cobre	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	Hierro	mg/L
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	Plomo	mg/L
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Litio	mg/L
Fosfatos	mg/L	Magnesio	mg/L
Fósforo total o fósforo	mg/L	Manganeso	mg/L
Nitritos	mg/L	Mercurio	mg/L
Nitratos	mg/L	Molibdeno	mg/L
Sulfatos	mg/L	Níquel	mg/L
Fenoles	mg/L	Potasio	mg/L
Sulfuros	mg/L	Selenio	mg/L
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	Sílice	mg/L
E.Coli	NMP/100mL	Plata	mg/L
Aluminio	mg/L	Sodio	mg/L
Antimonio	mg/L	Estroncio	mg/L
Arsénico	mg/L	Talio	mg/L
Bario	mg/L	Estaño	mg/L
Boro	mg/L	Titanio	mg/L
Berilio	mg/L	Vanadio	mg/L
Cadmio	mg/L	Zinc	mg/L

Tabla C. Estaciones de monitoreo analizadas en esta tesis

Estación	Este	Norte	Altitud (m s. n. m.)	Estación	Este	Norte	Altitud (m s. n. m.)
Qmina	746654	9233990	2946	RJequ7	706152	9197374	449
Qojos	747905	9235117	2960	RJequ8	696719	9198807	220
Qshil	768792	9227205	3621	RJequ9	691211	9195378	172
RJequ10	681070	9190013	156	Rllam	740879	9206578	714
RJequ11	667676	9190128	43	Rrejo	750025	9224128	2940
RJequ12	655813	9189084	4	RSMig	736830	9221687	2078
RJequ2	767779	9193491	1570	Rtint	762492	9224375	3012
RJequ5	729639	9202482	668	Ryana	743813	9228206	2800
RJequ6	709710	9197515	496				

Tabla D. Parámetros fisicoquímicos a utilizar en el análisis multivariado en esta tesis

Parámetros	Abreviatura	Unidades
Potencial hidrogeno	pH	Unidad de pH
Temperatura	T	°C
Oxígeno disuelto	OD	mg/L
Conductividad eléctrica	CE	µS/cm
Sólidos suspendidos totales	TSS	mg/L
Nitratos	Nitratos	mg/L
Coliformes	Col	NMP/100mL
Aluminio	Al	mg/L
Bario	Ba	mg/L
Boro	B	mg/L
Calcio	Ca	mg/L
Cobre	Cu	mg/L
Hierro	Fe	mg/L
Litio	Li	mg/L
Magnesio	Mg	mg/L
Manganeso	Mn	mg/L
Potasio	K	mg/L
Sodio	Na	mg/L
Estroncio	Sr	mg/L
Zinc	Zn	mg/L

Tabla E. Base de datos finales luego del tratamiento de datos

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
Qmina_15_1	13/07/2015	4.98	5.18	12.34	1738	0.084	14.73	2	4.03	0.067	0.018	400	0.2587	1.967	2.11	0.03	25.94	1.3548	7.12	1.112	0.127
QMin_15_2	19/10/2015	4.49	5.89	15.39	1577	0.51	28	1.8	3.727	0.064	0.02	396	0.25	1.849	2.87	0.027	24.33	3.709	7.07	1.017	0.16
QMin_16_1	02/05/2016	3.75	4.73	16.58	161.2	0.27	11	79	4.042	0.069	0.014	298.3	0.29	1.545	1.21	0.028	13.58	1.034	5.27	0.9465	0.176
QMin_16_2	26/09/2016	4.43	4.47	13.7	100.3	0.4	3	1.8	7.803	0.17	0.02	178.6	0.846	1.597	1.41	0.0072	10.21	1.309	6.66	0.4932	0.38
Qojos_15_1	13/07/2015	4.66	7.82	13	249.5	0.233	3	170	0.08	0.005	0.033	35.96	0.0015	0.13	1.41	0.003	4.21	0.0396	6.4	0.244	0.002
QOjos_15_2	19/10/2015	4.55	7.92	14.18	630.2	1.93	1	230	0.044	0.009	0.085	106.2	0.02	0.091	3.18	0.001	12.17	0.049	9.714	0.8648	0.011
QOjos_16_1	02/05/2016	4.17	7.27	14.91	534.7	0.29	14	79	0.687	0.008	0.032	70	0.008	0.423	1.22	0.001	7.691	0.141	5.33	0.3917	0.01
QOjos_16_2	26/09/2016	4.62	8.6	11.02	283.04	0.05	2	79	0.046	0.008	0.029	40.97	0.002	0.074	1.3	0.002	4.234	0.019	5.81	0.2631	0.004
Qshil_15_1	13/07/2015	4.09	8.95	10	527.9	0.981	10.1	1.8	0.63	0.002	0.031	97.09	0.0354	0.258	2.08	0.003	2.81	0.0387	5.25	0.312	0.044
QShil_15_2	20/10/2015	4.06	7.61	17.3	351.1	2	1	1.8	0.253	0.008	0.022	65.67	0.018	0.003	2.4	0.003	2.397	0.029	2.58	0.2435	0.034
QShil_16_1	03/05/2016	3.83	7.55	18.04	632	0.43	1	110	0.605	0.008	0.026	101.8	0.035	0.101	2.27	0.006	3.749	0.046	4	0.4702	0.042
QShil_16_2	27/09/2016	4.6	8.1	11.14	489	1.58	1	23	0.068	0.008	0.026	64.95	0.015	0.08	0.979	0.004	2.42	0.05	4.83	0.1617	0.052
RJequ10_15_1	17/07/2015	8.07	8.12	22.36	313.9	0.52	4.59	1.8	0.12	0.03	0.03	45.53	0.0008	0.108	1.19	0.003	6.26	0.0431	9.45	0.259	0.002
RJequ10_15_2	23/10/2015	8.8	8.37	26.65	310	0.16	5	330	0.129	0.025	0.03	44.97	0.002	0.174	1.39	0.002	5.01	0.04	8.56	0.236	0.011
RJequ10_16_1	06/05/2016	9.29	8.12	27.57	408.2	0.56	2	33	0.044	0.043	0.033	46.06	0.002	0.074	119	0.002	7.587	0.076	13.19	0.3749	0.011
RJequ10_16_2	30/09/2016	8.15	8.01	24.73	412.2	0.85	1	23	0.457	0.039	0.033	53.41	0.002	0.057	0.91	0.004	5.461	0.058	11.2	0.2241	0.004
RJequ11_15_1	17/07/2015	9.26	8.2	23.51	398.1	0.159	3	1.8	0.01	0.039	0.041	62.02	0.0007	0.056	1.33	0.003	8.83	0.033	14.53	0.4	0.002
RJequ11_15_2	23/10/2015	8.5	8.33	29.11	393.8	0.05	1	230	0.032	0.034	0.039	53.64	0.002	0.059	1.55	0.002	7.299	0.027	13.17	0.3372	0.012
RJequ11_16_1	06/05/2016	11.25	8.31	29.65	515.9	0.11	4	33	0.024	0.057	0.058	57.11	0.009	0.069	1.34	0.001	12.9	0.04	22.04	0.6021	0.00542
RJequ11_16_2	30/09/2016	8.65	8.22	23.7	503.2	0.12	2	460	0.282	0.035	0.045	62.68	0.002	0.075	0.87	0.003	7.897	0.038	15.17	0.3115	0.004
RJequ12_15_1	17/07/2015	7.94	8.21	26.15	707.6	0.03	9.13	1.8	0.16	0.086	0.054	70.35	0.0013	0.283	2.24	0.003	18.7	0.1042	56.92	0.58	0.002
RJequ12_15_2	23/10/2015	9.92	8.1	28.34	861	0.05	2	330	0.033	0.105	0.065	89.18	0.002	0.314	3.14	0.002	19.82	0.187	79.78	0.7113	0.012
RJequ12_16_1	06/05/2016	9.05	8.22	29.93	1046	0.11	1	23	0.0161	0.163	0.065	63.89	0.003	0.044	2.02	0.001	28.92	0.009	100.9	1.0189	0.0062
RJequ12_16_2	30/09/2016	80.1	7.6	23.1	3701	0.21	86	7.8	0.248	1.636	0.076	221.7	0.002	0.179	206.9	0.15	138.7	0.179	8191	2.7404	0.004

Tabla E. (Continuación)

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
RJegu2_15_1	14/07/2015	6.74	8.68	19.1	441.6	0.354	3	330	0.07	0.04	0.037	65.78	0.0004	0.01	0.92	0.004	12.15	0.0033	11.58	0.612	0.016
RJegu2_15_2	20/10/2015	4.44	8.58	15	445.6	0.54	2	79	0.049	0.047	0.042	65.94	0.002	0.01	1.17	0.007	12.61	0.009	16.47	0.693	0.02
RJegu2_16_1	04/05/2016	6.05	8.62	20.36	304.1	0.08	3	49	0.133	0.023	0.029	49.17	0.14	0.178	0.82	0.004	6.62	0.008	4.89	0.3896	0.013
RJegu2_16_2	27/09/2016	4.22	8.6	25.89	495.6	0.28	1	33	0.376	0.028	0.038	49.28	0.002	0.02	0.78	0.009	10.42	0.006	15.21	0.4732	0.004
RJegu5_15_1	16/07/2015	7.5	8.35	20	379.3	0.038	8.98	1700	0.4	0.059	0.038	50.69	0.0016	0.26	1.27	0.006	8.87	0.0233	14.78	0.374	0.002
RJegu5_15_2	22/10/2015	7.43	8.37	27.24	430.3	0.63	3	23	0.06	0.074	0.038	60.13	0.002	0.073	1.45	0.004	7.182	0.047	17.35	0.3669	0.008
RJegu5_16_1	05/05/2016	7.33	8.55	24.79	312.2	0.37	25	490	0.264	0.038	0.028	38.85	0.002	0.202	0.952	0.003	6.829	0.017	8.9	0.3108	0.004
RJegu5_16_2	29/09/2016	7.6	8.22	23.75	447	0.26	3	46	0.342	0.071	0.04	60.58	0.002	0.0995	1.2	0.007	6.964	0.045	20.28	0.3315	0.004
RJegu6_15_1	16/07/2015	7.9	8.46	26	395.3	0.403	12.46	1.8	0.38	0.058	0.04	54.57	0.0013	0.237	1.37	0.004	8.69	0.029	16.29	0.356	0.002
RJegu6_15_2	22/10/2015	7.88	8.11	28.43	472.9	0.62	2	230	0.039	0.054	0.044	65.12	0.002	0.065	1.36	0.002	7.973	0.023	17.83	0.3745	0.008
RJegu6_16_1	05/05/2016	7.28	8.42	26.88	280.8	0.16	15	330	0.295	0.036	0.028	34.26	0.002	0.181	0.93	0.003	5.502	0.018	9.38	0.2512	0.008
RJegu6_16_2	29/09/2016	7.89	7.18	24.42	557.9	0.3	3	130	0.602	0.04	0.046	75.61	0.002	0.108	0.85	0.003	7.82	0.019	18.39	0.3028	0.004
RJegu7_15_1	15/07/2015	8.28	8.59	26	385.9	0.315	13.42	1.8	0.37	0.057	0.038	51.88	0.0009	0.226	1.42	0.004	8.49	0.0355	15.75	0.346	0.002
RJegu7_15_2	22/10/2015	7.68	8.22	28.88	476.7	0.57	1	11000	0.022	0.053	0.057	66.47	0.002	0.063	1.48	0.002	7.826	0.042	17	0.3895	0.009
RJegu7_16_1	05/05/2016	7.09	8.83	26.28	269.6	0.13	11	790	0.254	0.032	0.025	32.68	0.002	0.156	0.93	0.003	5.197	0.015	8.96	0.2344	0.007
RJegu7_16_2	29/09/2016	7.79	8.23	27.02	534	0.34	4	7900	0.804	0.037	0.05	72.17	0.002	0.0995	0.977	0.003	7.35	0.037	17.1	0.3033	0.004
RJegu8_15_1	17/07/2015	7.09	8	24.27	228.8	0.346	7.46	49	0.43	0.02	0.024	32.31	0.002	0.267	1.24	0.003	4.58	0.0232	5.84	0.188	0.003
RJegu8_15_2	23/10/2015	7.55	8.24	23.48	256.6	0.05	20	330	0.243	0.022	0.028	36.93	0.008	0.28	1.49	0.002	4.322	0.034	6.87	0.2037	0.027
RJegu8_16_1	05/05/2016	7.29	8.29	27.2	248.4	0.5	14	70	0.216	0.024	0.032	29.94	0.002	0.177	1.27	0.001	4.23	0.019	6.54	0.2035	0.004
RJegu8_16_2	29/09/2016	7.65	8.4	24.37	274.6	0.22	3	2	0.693	0.013	0.031	36.42	0.002	0.108	0.951	0.002	3.869	0.021	7.08	0.1638	0.004
RJegu9_15_1	17/07/2015	8.16	8.08	22.45	230.1	0.428	8.82	1.8	0.18	0.021	0.03	36.74	0.025	0.242	1.26	0.003	4.8	0.0251	6.18	0.199	0.012
RJegu9_15_2	23/10/2015	8.23	8.48	25.07	257.4	0.05	12	230	0.213	0.022	0.028	36.92	0.002	0.25	1.5	0.002	4.318	0.029	7.02	0.2044	0.013
RJegu9_16_1	05/05/2016	7.92	8.76	27.58	255.9	0.4	9	490	0.257	0.026	0.032	31.39	0.002	0.153	1.28	0.001	4.445	0.0198	7.08	0.2143	0.004
RJegu9_16_2	29/09/2016	7.17	8.64	29.19	256.1	0.11	5	49	0.65	0.012	0.027	32.53	0.002	0.123	0.971	0.002	3.75	0.012	7.28	0.1561	0.004

Tabla E. (Continuación)

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
Rllam_15_1	15/07/2015	6.92	8.19	20	613.3	0.035	3	110	0.02	0.254	0.164	88.52	0.0004	0.145	2.65	0.023	14.93	0.1218	29.09	0.452	0.002
Rllam_15_2	21/10/2015	6.13	8.19	28.34	636.9	0.06	3	700	0.195	0.36	0.168	77.31	0.002	0.42	3.45	0.026	12.61	0.558	34.61	0.4272	0.026
Rllam_16_1	04/05/2016	6.47	8.47	21.47	181.2	0.17	8	1300	0.261	0.018	0.041	24.75	0.002	0.31	1.05	0.003	2.868	0.023	4.21	0.1161	0.008
Rllam_16_2	28/09/2016	4.26	7.82	17.77	617.4	1.28	1	33	0.037	0.025	0.035	58.98	0.002	0.033	3.4	0.005	10.73	0.082	33.24	0.1875	0.004
Rrejo_15_1	14/07/2015	4.95	7.8	8	342.4	0.563	5.99	490	0.14	0.002	0.042	56.7	0.0019	0.315	1.64	0.003	2.17	0.0626	5.32	0.25	0.01
RRejo_15_2	20/10/2015	4.41	8.04	15.7	202.3	0.78	1	2200	0.112	0.008	0.031	33.74	0.003	0.03	1.72	0.002	1.792	0.038	5.42	0.1823	0.024
RRejo_16_1	03/05/2016	4.45	7.7	16.18	96.12	0.08	1	1.8	0.146	0.018	0.016	9.594	0.005	0.226	0.76	0.001	0.88	0.02	2.49	0.0858	0.032
RRejo_16_2	27/09/2016	14.75	8.4	13.8	181.6	0.16	3	220	0.582	0.008	0.027	16.93	0.002	0.374	0.93	0.002	1.555	0.041	4.73	0.1175	0.004
RSMig_15_1	15/07/2015	5.82	8.03	13	73.46	0.084	68.4	3300	0.79	0.011	0.03	9.93	0.0314	1.047	1.23	0.003	2.74	0.0575	4.82	0.065	0.021
RSMig_15_2	21/10/2015	5.43	8.19	16.44	89.25	0.26	26	23000	0.523	0.036	0.015	7.903	0.002	0.756	1.56	0.001	1.999	0.03	4.92	0.0632	0.062
RSMig_16_1	04/05/2016	5.86	7.48	12.61	40.18	0.17	35	49000	0.899	0.011	0.014	5.944	0.009	0.9973	0.73	0.001	2.145	0.039	2.97	0.0538	0.036
RSMig_16_2	27/09/2016	4.84	6.93	13.8	128.9	0.36	3	330	1.578	0.008	0.018	6.981	0.003	0.557	0.93	0.001	1.978	0.011	6.23	0.0512	0.004
Rtint_15_1	14/07/2015	4.77	8.35	8	348.1	0.655	3	490	0.13	0.002	0.039	64.65	0.0029	0.176	1.63	0.003	2.1	0.0498	5.22	0.261	0.011
RTint_15_2	20/10/2015	4.56	8.86	16.01	211.1	0.8	1	7.8	0.149	0.008	0.029	34.88	0.003	0.01	1.62	0.002	1.748	0.011	5.08	0.1797	0.017
RTint_16_1	03/05/2016	4.58	7.81	12.36	90.58	0.11	1	7.8	0.165	0.033	0.017	9.718	0.006	0.226	0.71	0.001	0.841	0.02	2.76	0.0845	0.06
RTint_16_2	27/09/2016	4.49	8.13	13.55	188	0.11	1	7.8	0.366	0.008	0.03	17.98	0.004	0.225	0.86	0.002	1.538	0.026	4.3	0.117	0.006
Ryana_15_1	13/07/2015	5.53	8.25	12.68	260.3	0.03	3.32	490	0.14	0.02	0.019	19.98	0.004	0.175	1.12	0.003	2.72	0.0242	4.03	0.116	0.002
Ryana_15_2	19/10/2015	5.24	8.79	17.15	186.2	0.21	1	490	0.258	0.035	0.026	26.63	0.01	0.318	1.99	0.004	3.408	0.035	6.26	0.1578	0.011
Ryana_16_1	02/05/2016	4.75	8.32	13.13	1059	0.1	6	1.8	0.283	0.011	0.015	15.27	0.007	0.296	0.83	0.001	1.968	0.032	3.25	0.1012	0.007
RYana_16_2	26/09/2016	4.82	8.09	15.76	151.1	0.05	1	230	0.19	0.022	0.018	19.44	0.006	0.189	1.33	0.005	2.348	0.013	4.79	0.1003	0.004

Tabla F. Base de datos para la temporada de avenida

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	Colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
QMin_15_2	19/10/2015	4.49	5.89	15.39	1577	0.51	28	1.8	3.727	0.064	0.02	396	0.25	1.849	2.87	0.027	24.33	3.709	7.07	1.017	0.16
QMin_16_2	26/09/2016	4.43	4.47	13.7	100.3	0.4	3	1.8	7.803	0.17	0.02	178.6	0.846	1.597	1.41	0.0072	10.21	1.309	6.66	0.4932	0.38
QOjos_15_2	19/10/2015	4.55	7.92	14.18	630.2	1.93	1	230	0.044	0.009	0.085	106.2	0.02	0.091	3.18	0.001	12.17	0.049	9.714	0.8648	0.011
QOjos_16_2	26/09/2016	4.62	8.6	11.02	283.04	0.05	2	79	0.046	0.008	0.029	40.97	0.002	0.074	1.3	0.002	4.234	0.019	5.81	0.2631	0.004
QShil_15_2	20/10/2015	4.06	7.61	17.3	351.1	2	1	1.8	0.253	0.008	0.022	65.67	0.018	0.003	2.4	0.003	2.397	0.029	2.58	0.2435	0.034
QShil_16_2	27/09/2016	4.6	8.1	11.14	489	1.58	1	23	0.068	0.008	0.026	64.95	0.015	0.08	0.979	0.004	2.42	0.05	4.83	0.1617	0.052
RJequ10_15_2	23/10/2015	8.8	8.37	26.65	310	0.16	5	330	0.129	0.025	0.03	44.97	0.002	0.174	1.39	0.002	5.01	0.04	8.56	0.236	0.011
RJequ10_16_2	30/09/2016	8.15	8.01	24.73	412.2	0.85	1	23	0.457	0.039	0.033	53.41	0.002	0.057	0.91	0.004	5.461	0.058	11.2	0.2241	0.004
RJequ11_15_2	23/10/2015	8.5	8.33	29.11	393.8	0.05	1	230	0.032	0.034	0.039	53.64	0.002	0.059	1.55	0.002	7.299	0.027	13.17	0.3372	0.012
RJequ11_16_2	30/09/2016	8.65	8.22	23.7	503.2	0.12	2	460	0.282	0.035	0.045	62.68	0.002	0.075	0.87	0.003	7.897	0.038	15.17	0.3115	0.004
RJequ12_15_2	23/10/2015	9.92	8.1	28.34	861	0.05	2	330	0.033	0.105	0.065	89.18	0.002	0.314	3.14	0.002	19.82	0.187	79.78	0.7113	0.012
RJequ12_16_2	30/09/2016	80.1	7.6	23.1	3701	0.21	86	7.8	0.248	1.636	0.076	221.7	0.002	0.179	206.9	0.15	138.7	0.179	8191	2.7404	0.004
RJequ2_15_2	20/10/2015	4.44	8.58	15	445.6	0.54	2	79	0.049	0.047	0.042	65.94	0.002	0.01	1.17	0.007	12.61	0.009	16.47	0.693	0.02
RJequ2_16_2	27/09/2016	4.22	8.6	25.89	495.6	0.28	1	33	0.376	0.028	0.038	49.28	0.002	0.02	0.78	0.009	10.42	0.006	15.21	0.4732	0.004
RJequ5_15_2	22/10/2015	7.43	8.37	27.24	430.3	0.63	3	23	0.06	0.074	0.038	60.13	0.002	0.073	1.45	0.004	7.182	0.047	17.35	0.3669	0.008
RJequ5_16_2	29/09/2016	7.6	8.22	23.75	447	0.26	3	46	0.342	0.071	0.04	60.58	0.002	0.0995	1.2	0.007	6.964	0.045	20.28	0.3315	0.004

Tabla F. (Continuación)

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	Colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
RJegu6_15_2	22/10/2015	7.88	8.11	28.43	472.9	0.62	2	230	0.039	0.054	0.044	65.12	0.002	0.065	1.36	0.002	7.973	0.023	17.83	0.3745	0.008
RJegu6_16_2	29/09/2016	7.89	7.18	24.42	557.9	0.3	3	130	0.602	0.04	0.046	75.61	0.002	0.108	0.85	0.003	7.82	0.019	18.39	0.3028	0.004
RJegu7_15_2	22/10/2015	7.68	8.22	28.88	476.7	0.57	1	11000	0.022	0.053	0.057	66.47	0.002	0.063	1.48	0.002	7.826	0.042	17	0.3895	0.009
RJegu7_16_2	29/09/2016	7.79	8.23	27.02	534	0.34	4	7900	0.804	0.037	0.05	72.17	0.002	0.0995	0.977	0.003	7.35	0.037	17.1	0.3033	0.004
RJegu8_15_2	23/10/2015	7.55	8.24	23.48	256.6	0.05	20	330	0.243	0.022	0.028	36.93	0.008	0.28	1.49	0.002	4.322	0.034	6.87	0.2037	0.027
RJegu8_16_2	29/09/2016	7.65	8.4	24.37	274.6	0.22	3	2	0.693	0.013	0.031	36.42	0.002	0.108	0.951	0.002	3.869	0.021	7.08	0.1638	0.004
RJegu9_15_2	23/10/2015	8.23	8.48	25.07	257.4	0.05	12	230	0.213	0.022	0.028	36.92	0.002	0.25	1.5	0.002	4.318	0.029	7.02	0.2044	0.013
RJegu9_16_2	29/09/2016	7.17	8.64	29.19	256.1	0.11	5	49	0.65	0.012	0.027	32.53	0.002	0.123	0.971	0.002	3.75	0.012	7.28	0.1561	0.004
RIlam_15_2	21/10/2015	6.13	8.19	28.34	636.9	0.06	3	700	0.195	0.36	0.168	77.31	0.002	0.42	3.45	0.026	12.61	0.558	34.61	0.4272	0.026
RIlam_16_2	28/09/2016	4.26	7.82	17.77	617.4	1.28	1	33	0.037	0.025	0.035	58.98	0.002	0.033	3.4	0.005	10.73	0.082	33.24	0.1875	0.004
RRejo_15_2	20/10/2015	4.41	8.04	15.7	202.3	0.78	1	2200	0.112	0.008	0.031	33.74	0.003	0.03	1.72	0.002	1.792	0.038	5.42	0.1823	0.024
RRejo_16_2	27/09/2016	14.75	8.4	13.8	181.6	0.16	3	220	0.582	0.008	0.027	16.93	0.002	0.374	0.93	0.002	1.555	0.041	4.73	0.1175	0.004
RSMig_15_2	21/10/2015	5.43	8.19	16.44	89.25	0.26	26	23000	0.523	0.036	0.015	7.903	0.002	0.756	1.56	0.001	1.999	0.03	4.92	0.0632	0.062
RSMig_16_2	27/09/2016	4.84	6.93	13.8	128.9	0.36	3	330	1.578	0.008	0.018	6.981	0.003	0.557	0.93	0.001	1.978	0.011	6.23	0.0512	0.004
RTint_15_2	20/10/2015	4.56	8.86	16.01	211.1	0.8	1	7.8	0.149	0.008	0.029	34.88	0.003	0.01	1.62	0.002	1.748	0.011	5.08	0.1797	0.017
RTint_16_2	27/09/2016	4.49	8.13	13.55	188	0.11	1	7.8	0.366	0.008	0.03	17.98	0.004	0.225	0.86	0.002	1.538	0.026	4.3	0.117	0.006
Ryana_15_2	19/10/2015	5.24	8.79	17.15	186.2	0.21	1	490	0.258	0.035	0.026	26.63	0.01	0.318	1.99	0.004	3.408	0.035	6.26	0.1578	0.011
RYana_16_2	26/09/2016	4.82	8.09	15.76	151.1	0.05	1	230	0.19	0.022	0.018	19.44	0.006	0.189	1.33	0.005	2.348	0.013	4.79	0.1003	0.004

Tabla G. Base de datos para la temporada de estiaje

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	Colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
Qmina_15_1	13/07/2015	4.98	5.18	12.34	1738	0.084	14.73	2	4.03	0.067	0.018	400	0.2587	1.967	2.11	0.03	25.94	1.3548	7.12	1.112	0.127
QMin_16_1	02/05/2016	3.75	4.73	16.58	161.2	0.27	11	79	4.042	0.069	0.014	298.3	0.29	1.545	1.21	0.028	13.58	1.034	5.27	0.9465	0.176
Qojos_15_1	13/07/2015	4.66	7.82	13	249.5	0.233	3	170	0.08	0.005	0.033	35.96	0.0015	0.13	1.41	0.003	4.21	0.0396	6.4	0.244	0.002
QOjos_16_1	02/05/2016	4.17	7.27	14.91	534.7	0.29	14	79	0.687	0.008	0.032	70	0.008	0.423	1.22	0.001	7.691	0.141	5.33	0.3917	0.01
Qshil_15_1	13/07/2015	4.09	8.95	10	527.9	0.981	10.1	1.8	0.63	0.002	0.031	97.09	0.0354	0.258	2.08	0.003	2.81	0.0387	5.25	0.312	0.044
QShil_16_1	03/05/2016	3.83	7.55	18.04	632	0.43	1	110	0.605	0.008	0.026	101.8	0.035	0.101	2.27	0.006	3.749	0.046	4	0.4702	0.042
RJequ10_15_1	17/07/2015	8.07	8.12	22.36	313.9	0.52	4.59	1.8	0.12	0.03	0.03	45.53	0.0008	0.108	1.19	0.003	6.26	0.0431	9.45	0.259	0.002
RJequ10_16_1	06/05/2016	9.29	8.12	27.57	408.2	0.56	2	33	0.044	0.043	0.033	46.06	0.002	0.074	1.19	0.002	7.587	0.076	13.19	0.3749	0.011
RJequ11_15_1	17/07/2015	9.26	8.2	23.51	398.1	0.159	3	1.8	0.01	0.039	0.041	62.02	0.0007	0.056	1.33	0.003	8.83	0.033	14.53	0.4	0.002
RJequ11_16_1	06/05/2016	11.25	8.31	29.65	515.9	0.11	4	33	0.024	0.057	0.058	57.11	0.009	0.069	1.34	0.001	12.9	0.04	22.04	0.6021	0.00542
RJequ12_15_1	17/07/2015	7.94	8.21	26.15	707.6	0.03	9.13	1.8	0.16	0.086	0.054	70.35	0.0013	0.283	2.24	0.003	18.7	0.1042	56.92	0.58	0.002
RJequ12_16_1	06/05/2016	9.05	8.22	29.93	1046	0.11	1	23	0.0161	0.163	0.065	63.89	0.003	0.044	2.02	0.001	28.92	0.009	100.9	1.0189	0.0062
RJequ2_15_1	14/07/2015	6.74	8.68	19.1	441.6	0.354	3	330	0.07	0.04	0.037	65.78	0.0004	0.01	0.92	0.004	12.15	0.0033	11.58	0.612	0.016
RJequ2_16_1	04/05/2016	6.05	8.62	20.36	304.1	0.08	3	49	0.133	0.023	0.029	49.17	0.14	0.178	0.82	0.004	6.62	0.008	4.89	0.3896	0.013
RJequ5_15_1	16/07/2015	7.5	8.35	20	379.3	0.038	8.98	1700	0.4	0.059	0.038	50.69	0.0016	0.26	1.27	0.006	8.87	0.0233	14.78	0.374	0.002
RJequ5_16_1	05/05/2016	7.33	8.55	24.79	312.2	0.37	25	490	0.264	0.038	0.028	38.85	0.002	0.202	0.952	0.003	6.829	0.017	8.9	0.3108	0.004

Tabla G. (Continuación)

Estación	Fecha	OD	pH	T	CE	Nitratos	TSS	Colf	Al	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Sr	Zn
RJequ6_15_1	16/07/2015	7.9	8.46	26	395.3	0.403	12.46	1.8	0.38	0.058	0.04	54.57	0.0013	0.237	1.37	0.004	8.69	0.029	16.29	0.356	0.002
RJequ6_16_1	05/05/2016	7.28	8.42	26.88	280.8	0.16	15	330	0.295	0.036	0.028	34.26	0.002	0.181	0.93	0.003	5.502	0.018	9.38	0.2512	0.008
RJequ7_15_1	15/07/2015	8.28	8.59	26	385.9	0.315	13.42	1.8	0.37	0.057	0.038	51.88	0.0009	0.226	1.42	0.004	8.49	0.0355	15.75	0.346	0.002
RJequ7_16_1	05/05/2016	7.09	8.83	26.28	269.6	0.13	11	790	0.254	0.032	0.025	32.68	0.002	0.156	0.93	0.003	5.197	0.015	8.96	0.2344	0.007
RJequ8_15_1	17/07/2015	7.09	8	24.27	228.8	0.346	7.46	49	0.43	0.02	0.024	32.31	0.002	0.267	1.24	0.003	4.58	0.0232	5.84	0.188	0.003
RJequ8_16_1	05/05/2016	7.29	8.29	27.2	248.4	0.5	14	70	0.216	0.024	0.032	29.94	0.002	0.177	1.27	0.001	4.23	0.019	6.54	0.2035	0.004
RJequ9_15_1	17/07/2015	8.16	8.08	22.45	230.1	0.428	8.82	1.8	0.18	0.021	0.03	36.74	0.025	0.242	1.26	0.003	4.8	0.0251	6.18	0.199	0.012
RJequ9_16_1	05/05/2016	7.92	8.76	27.58	255.9	0.4	9	490	0.257	0.026	0.032	31.39	0.002	0.153	1.28	0.001	4.445	0.0198	7.08	0.2143	0.004
RIlam_15_1	15/07/2015	6.92	8.19	20	613.3	0.035	3	110	0.02	0.254	0.164	88.52	0.0004	0.145	2.65	0.023	14.93	0.1218	29.09	0.452	0.002
RIlam_16_1	04/05/2016	6.47	8.47	21.47	181.2	0.17	8	1300	0.261	0.018	0.041	24.75	0.002	0.31	1.05	0.003	2.868	0.023	4.21	0.1161	0.008
Rrejo_15_1	14/07/2015	4.95	7.8	8	342.4	0.563	5.99	490	0.14	0.002	0.042	56.7	0.0019	0.315	1.64	0.003	2.17	0.0626	5.32	0.25	0.01
RRejo_16_1	03/05/2016	4.45	7.7	16.18	96.12	0.08	1	1.8	0.146	0.018	0.016	9.594	0.005	0.226	0.76	0.001	0.88	0.02	2.49	0.0858	0.032
RSMig_15_1	15/07/2015	5.82	8.03	13	73.46	0.084	68.4	3300	0.79	0.011	0.03	9.93	0.0314	1.047	1.23	0.003	2.74	0.0575	4.82	0.065	0.021
RSMig_16_1	04/05/2016	5.86	7.48	12.61	40.18	0.17	35	49000	0.899	0.011	0.014	5.944	0.009	0.9973	0.73	0.001	2.145	0.039	2.97	0.0538	0.036
Rtint_15_1	14/07/2015	4.77	8.35	8	348.1	0.655	3	490	0.13	0.002	0.039	64.65	0.0029	0.176	1.63	0.003	2.1	0.0498	5.22	0.261	0.011
RTint_16_1	03/05/2016	4.58	7.81	12.36	90.58	0.11	1	7.8	0.165	0.033	0.017	9.718	0.006	0.226	0.71	0.001	0.841	0.02	2.76	0.0845	0.06
Ryana_15_1	13/07/2015	5.53	8.25	12.68	260.3	0.03	3.32	490	0.14	0.02	0.019	19.98	0.004	0.175	1.12	0.003	2.72	0.0242	4.03	0.116	0.002
Ryana_16_1	02/05/2016	4.75	8.32	13.13	1059	0.1	6	1.8	0.283	0.011	0.015	15.27	0.007	0.296	0.83	0.001	1.968	0.032	3.25	0.1012	0.007

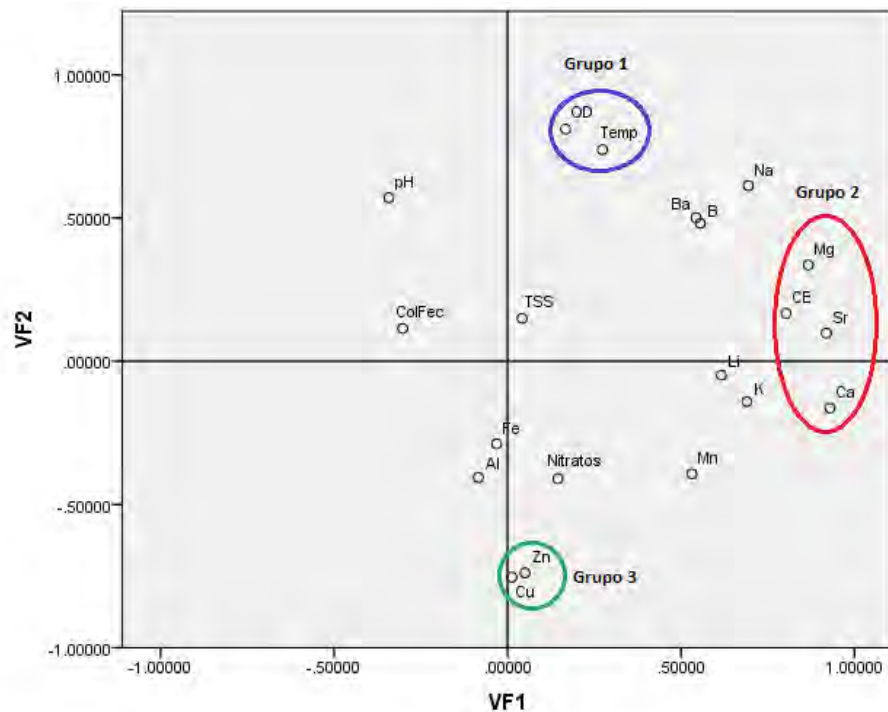


Figura A. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2

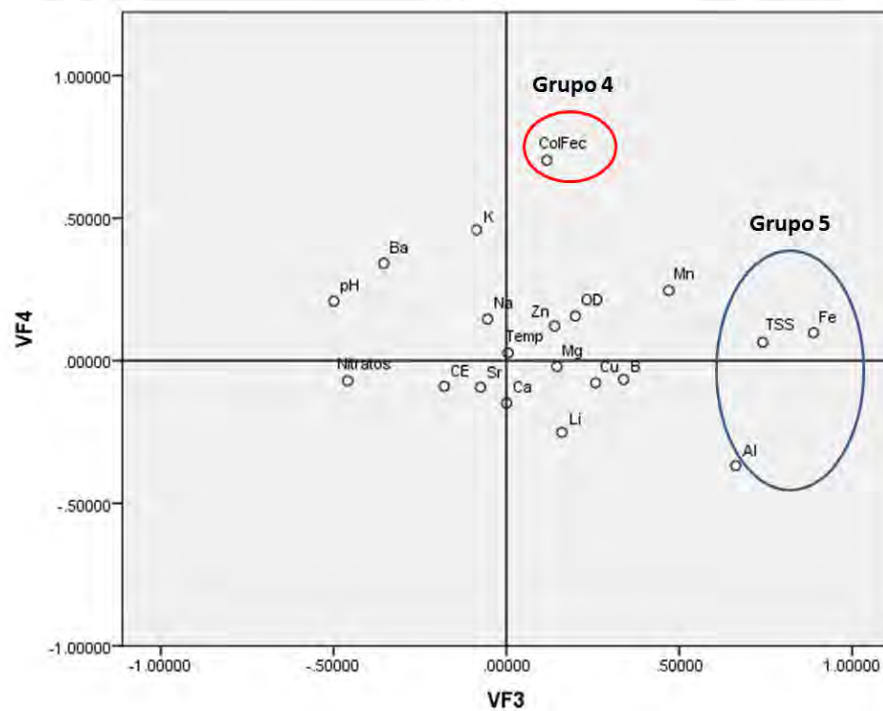


Figura B. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4

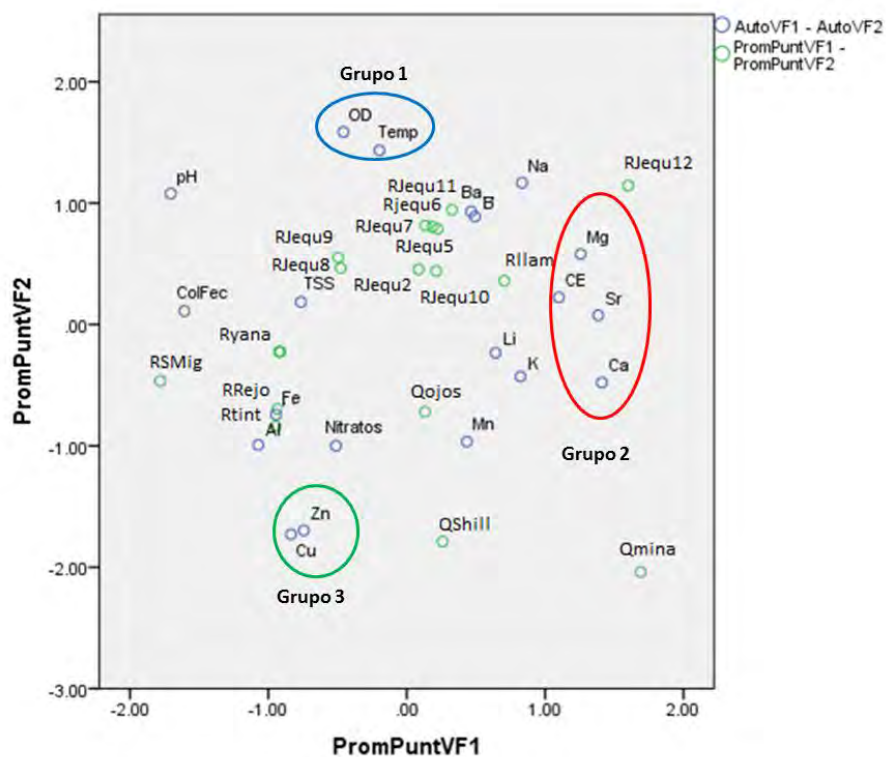


Figura C. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores rotados 1 y 2 de los parámetros

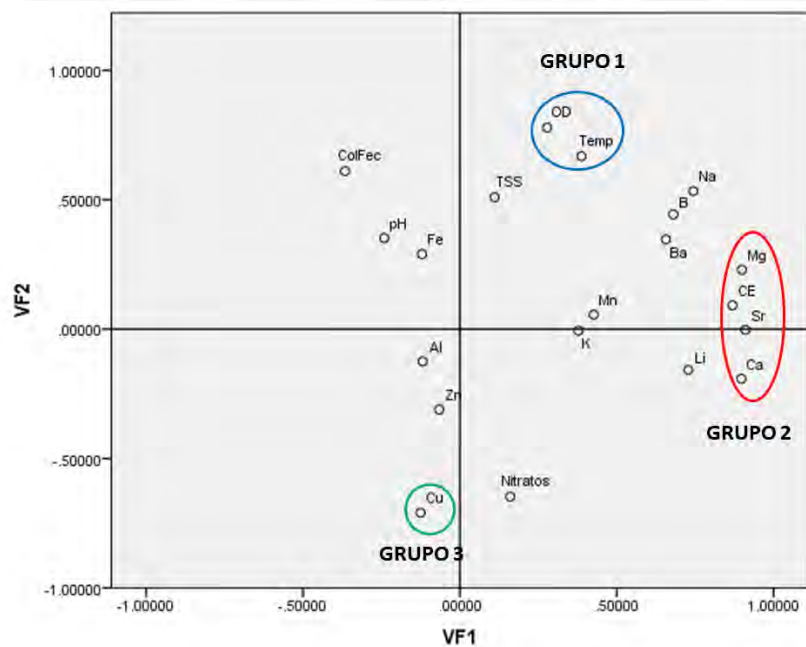
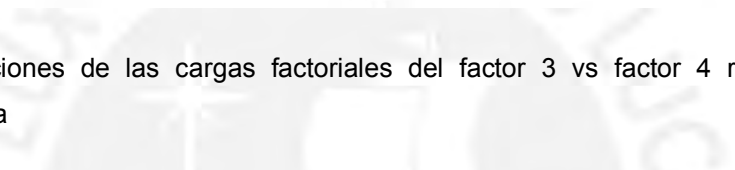


Figura D. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 rotados para la temporada de avenida



AutoVF1 - AutoVF2
PromPuntCP1 - Prom



Scatter plot of the first two principal components (PC1 and PC2) for 18 elements. The elements are grouped into three clusters: GRUPO 1 (blue), GRUPO 2 (red), and GRUPO 3 (green). GRUPO 2 elements (Mg, CE, Sr) are circled in red.

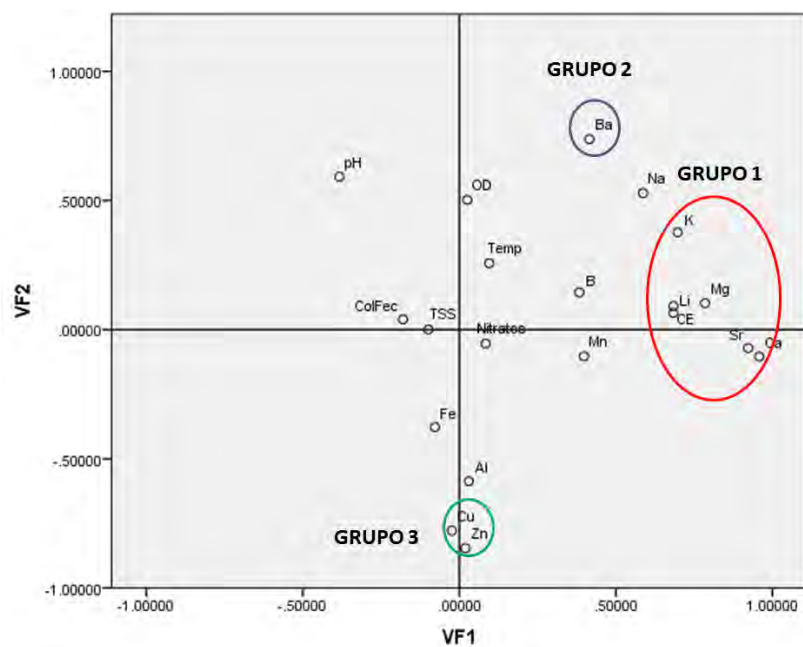


Figura G. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 1 vs factor 2 rotados para la temporada de estiaje

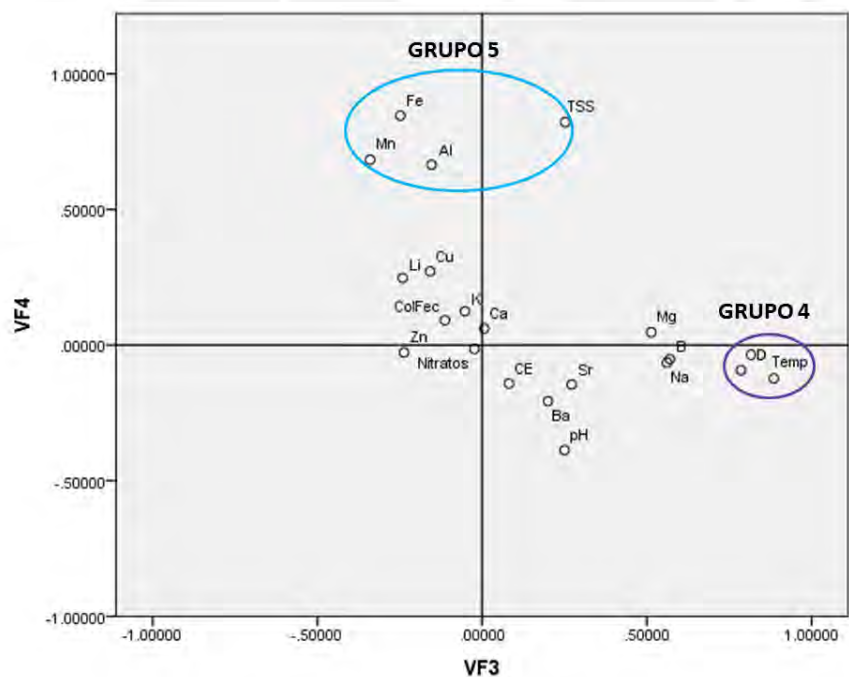


Figura H. Coordinaciones de las cargas factoriales del factor 3 vs factor 4 rotados para la temporada estiaje

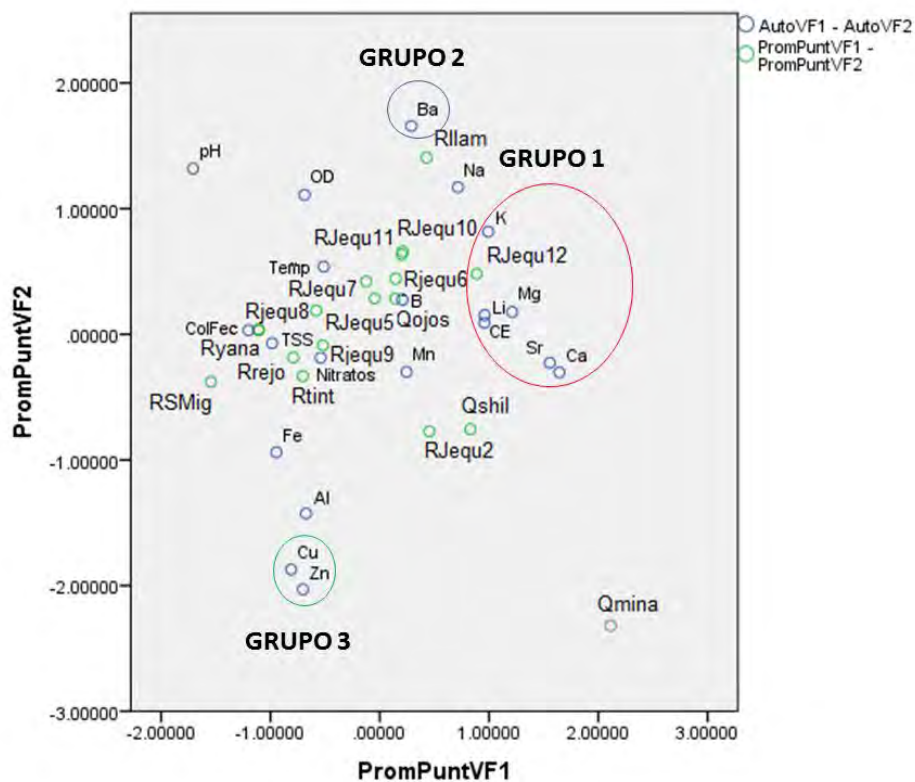


Figura I. Puntuaciones factoriales de las estaciones vs cargas factoriales de los factores rotados 1 y 2 de los parámetros para la temporada de estiaje